

射频电磁场比吸收率 (SAR) 测量技术

主 编 刘宇军 武 彤 尹洪雁
副主编 张 康 沈庆飞 刘 扬

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目（CIP）数据

射频电磁场比吸收率（SAR）测量技术 / 刘宇军，武彤，尹洪雁主编. —北京：电子工业出版社，2017.5

ISBN 978-7-121-31059-1

I. ①射… II. ①刘… ②武… ③尹… III. ①射频—电磁场—人体—吸收率—测量技术 IV. ①R594.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 046651 号

责任编辑：华 睿

印 刷：

装 订：

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：10 字数：252 千字

版 次：2017 年 5 月第 1 版

印 次：2017 年 5 月第 1 次印刷

定 价：50.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：电话（010）88254595；邮箱 xdhx@phei.com.cn；QQ：1229371215；微信 aishangshulihua。

编 委 会

主 编：刘宇军 武 彤 尹洪雁

副主编：张 康 沈庆飞 刘 扬

编 者：白陌音 张 钢 何鹂颖 张瑞宏 袁少权 杨 猛

宝 暄 武 鹏 尚士进 许真真 李 洋 郭 峰

翟明岳 贝午阳 苏岭东 王义伟 袁晶晶 张懿操

前 言

在 2015 年 5 月,来自 39 个国家 190 位科学家共同向联合国、各成员国、世卫组织(WHO)呈交诉求(International Electromagnetic Field Scientist Appeal),要求采纳更有保护性的电磁场及无线技术使用防护指导准则,认为危害的证据越来越多,电磁场及无线技术正成为上升很快的全球环境污染新形式。诉求中强调 WHO 国际癌症研究会在 2011 年将射频辐射列入 2B 类“可能致癌物”,但 WHO 持续无视其附属机构建议,继续采用国际辐射防护委员会推荐的无线电行业内部人士自行选定编纂的指导准则。哥伦比亚大学的 Martin Blank 博士表示:“国际电磁场使用准则必须加大反映对人体的实际影响,特别是对人体基因的影响,必须以更有保护性的准则来减少电磁场使用。”加州大学伯克利分校 Joel Moskowitz 博士说:“国际辐射防护委员会指导准则使用标准规定了短期高强度热效应,但不能保护我们免受现在长期低强度常规使用的危害。签署诉求的科学家要求联合国及其成员国保护全球人类与野生动植物避免电磁场危害。”

电磁辐射可对人体健康甚至安全造成多种危害,医学机理目前尚不完全清楚,电磁场近场或远场作用在人体这种电介质体,基本现象是人体器官组织对电磁场功率的热吸收。各种制式无线数字通信的广泛使用,已使越来越多的使用者关心便携无线设备和接入网基站电台的电磁辐射对自身安全和健康的影响。

比吸收率(Specific Absorption Rate,简称 SAR,SI 单位制:W/kg)即用来评估无线通信产品靠近人体使用时人体在电磁辐射中的暴露量,是反映单位人体组织吸收电磁场功率大小的量值。在 SAR 测量应用中,需要在相应无线通信频率(典型范围 300MHz~6GHz)对可重复使用的人体组织模拟材料(通常是液体)复介电常数进行可追溯的准确的测量(测量标准 IEC 62209 和 IEEE std 1528 对准确度要求是 $\pm 5\%$)。通过测量假人模型组织模拟液的 SAR 值分布及其峰值来评价无线电辐射源对人体热效应的强弱。物理量比吸收率直接反映人体所受电磁场热作用大小,作为安全法规的基本限值量,约束无线设备在不同工作和使用状态下的最大电磁辐射功率。

本书以射频电磁场人体比吸收率量值为中心,介绍了射频电磁场比吸收率测量技术。主要内容包括:电磁辐射人体暴露量限值标准法规、SAR 测量系统及应用实例、SAR 测量不确定度、SAR 测量系统验证,以及与 SAR 测量技术相关的组织模拟液介电常数测量、波导标准场装置等。

目 录

第 1 章 电子电气产品电磁辐射人体暴露量限值标准	1
1.1 人体比吸收率标准及法规	2
1.2 不同国家和地区对电磁辐射暴露量限值的规定	2
1.3 世界国家和区域比吸收率测试要求	3
1.4 限值法规和测量标准	6
第 2 章 比吸收率测量系统 (DASY) 简介和应用	8
2.1 概述	8
2.2 硬件组件	9
2.3 机器手臂	27
2.4 操作指南	37
2.5 应用软件概述	49
2.6 应用软件设置	50
第 3 章 比吸收率测量系统 (SARA-C) 简介和应用	75
3.1 概述	75
3.2 硬件安装	76
3.3 软件安装及要求	79
3.4 用垂直探头进行 DUT 测量的程序	80
3.5 无线设备头侧部测试 SAR 值程序	82
第 4 章 比吸收率测量不确定度评估	84
4.1 测量原理	84
4.2 数学模型	85
4.3 标准不确定度及传播系数	85
4.4 标准不确定度分析与评估	86
4.5 合成标准不确定度	90
4.6 合成标准不确定度的有效自由度	90
4.7 测量不确定度的包含因子	91
4.8 扩展不确定度的计算	91
4.9 测量不确定度评估一览表 (如表 4-1 所示)	91
第 5 章 比吸收率测量系统验证	93
5.1 SAR 测量系统验证的目的	93
5.2 SAR 测量系统验证流程	94
5.3 功率设置	94
5.4 实验室电波环境	96
5.5 补充的检查	96

5.6	DASY 系列 SAR 测量系统验证.....	97
第 6 章	开路同轴探头液体介电特性测量技术	100
6.1	开路同轴探头横电磁波模型法	101
6.2	数值实验	107
6.3	测量实验结果和探讨	112
第 7 章	液体填充矩形波导标准场装置	115
7.1	标定 SAR 近场探头的三段级联波导标准场实验装置.....	115
7.2	用波导台阶完善过渡波导介质匹配窗的装配可靠性	117
7.3	三段级联波导反射和传输特性数值实验.....	127
第 8 章	比吸收率测试能力验证.....	143
8.1	SAR 测试能力验证的目的意义	143
8.2	SAR 测试能力验证方法	143
8.3	结果统计分析设计及能力评价原则	146
8.4	结果统计及能力评价	147
8.5	技术分析	147
8.6	参加实验室测量数据和能力验证结果列表	147
参考文献	151

第 1 章 电子电气产品电磁辐射

人体暴露量限值标准

电子产品电磁辐射的测量与安全评价是国内外行业关注的焦点之一，许多国际标准化和研究机构对电磁辐射测量和电磁辐射安全评价进行了深入的研究。

IEC TC106 是主要研究与人体有关的电磁现象、电磁环境，人体暴露于电场、磁场和电磁场的评定方法、测量方法及计算方法的国际标准组织。在 IEC TC106 工作委员会内部设有专门研究电磁辐射安全评价的项目组，制定了有关的国际标准。其中 MT1 是研究终端电磁辐射测量、计算方法；IEC62209—1 主要涉及靠近耳边使用的终端的电磁辐射测量方法；IEC62209—2 主要研究手持和身体佩戴使用的无线通信设备对人体的电磁照射；PT62479 主要研究低功率电子电气产品电磁辐射对人体健康的评价。

ITU—T SG5 任务组是研究关于电磁环境影响的保护，与通信电磁辐射以及人类健康相关的研究课题是 SG5 下的 WP2/5 中的第 3 议题，即与移动设备和无线系统有关的无线电频率环境特征以及健康影响。

IEEE 是国际电气电子工程师学会，其中 TC95 小组主要研究人体暴露于 3kHz~300GHz 的电磁场中的生物学效应；TC34 主要研究包括移动通信终端在内的电子产品电磁辐射测量。IEEE TC34 与 IEC TC106 PT62209 是以联合工作组的方式开展工作。

中国也较早关注了国际电磁辐射安全评价领域的发展动态，目前主要集中在比吸收率的测量方面。北京出入境检验检疫局检验检疫技术中心等多家实验室和企业配备了比吸收率测量设备，有些实验室获得了国外机构的认可，主要提供比吸收率的测量服务。中国计量科学研究院主导的“全国照射人体有关电、磁和电磁领域评定方法标准化技术工作组”对口 IEC TC106 的工作，目前完成了一系列电磁辐射暴露量的限值标准。

综合国际和国内的情况看，电子产品电磁辐射安全评价的研究正蓬勃兴起，几乎主要的国际标准组织都有这方面的研究内容。应该说，他们的研究内容代表了电子产品电磁辐射安全评价的国际最高水平，值得说明的是，我们国家的有关技术人员也参与了这些标准的制定，有力地保证了中国的国家利益。

1.1 人体比吸收率标准及法规

1.1.1 国际标准及法规

国际电子电工委员会 TC106 除对电磁辐射安全研究之外，近年来还组织针对电磁辐射安全的具体评价方法即人体比吸收率 SAR 测量的研究，并且有了一定的研究成果，开展了测量不确定度评估。各个国家也根据其国内的研究情况及民众接受程度制定法规，建立相关标准。1985 年，FCC 在接触限值的基础上，委托美国国际电气电子工程师协会（IEEE）制定了射频能量标准。1993 年，FCC 开始更新其射频暴露限值以适应 ANSI/IEEE 标准的变化。1997 年以来，FCC 公布了手机电磁安全性评价标准，规定的 SAR 值为 1.6W/kg，并致力于制定统一的电信行业测试程序，要求手机在销售之前进行 SAR 测试。从 1999 年 2 月起，欧洲开始实施手机电磁辐射防护标准 IEEE1528SAR—200X，这是由国际非电离辐射保护委员会（ICNIRP）规定的，SAR 值为 2.0W/kg。

目前，在限定手机和基站设备的辐射值方面，欧洲采用的 IEEE1528SAR—200X 标准被世界上大多数国家和地区所采用和接受。根据科学家对动物的研究表明 4W/kg 已经被公认为是整个生物体暴露在射频下的上限。对一般公众，国际非电离辐射保护委员会制定的 2W/kg 射频暴露限制，已经留出了很大的安全余量。由于 ICNIRP 标准“以对所有科学资料进行仔细分析为基础的，并可以为所有确定的射频辐射危险提供很大的安全性保障”，因而得到了世界卫生组织（WHO）的支持和采用，也被国际电信联盟推荐使用。

1.1.2 国内标准及法规

居民电磁环境是复杂的，为了有效的行政管理，中国于 1988 年 6 月制定了《GB 8702—88 电磁辐射防护规定》，防护限值的频率范围为 100kHz~300GHz。这一标准规定，在 24h 内，任意连续 6min 全身平均比吸收率（SAR）小于 0.02W/kg。2015 年 1 月 1 日，国标新版本 GB 8702—2014 正式生效，该标准取代 GB 8702—88 和 GB 9175—88，其中所涉及通信频段公众限值保持不变。

1.2 不同国家和地区对电磁辐射暴露量限值的规定

1.2.1 国外对电磁辐射暴露量限值的规定

目前国际上比较通用的手机电磁辐射限值的规定是 1998 年国际非电离辐射防护委员会（ICNIRP）规定的，并被国际电信联盟推荐使用。对于不同的频率范围，采用不同的基本限值参数：

1Hz 至 10MHz，基本限值为电流密度。

100kHz 至 10GHz，基本限值为 SAR。在 100kHz 至 10MHz，基本限值为 SAR 和电流密度；

10GHz 至 300GHz，基本限值为功率密度。

手机的工作频率为 0.9G~1.8GHz，基本限值要求为 SAR，指在任意 6min，暴露在空间的 10g 人体组织的平均值。其中最重要的限值是对人的头部和躯干规定不大于 2W/kg（如表 1-1 所示），因为大部分的手机使用者都是贴近这两个部位。不同国家和地区参照国际标准也可以有不同的要求。

表 1-1 人体各部分 SAR 限值

全身平均 SAR (W/kg)	局部暴露 SAR (头和躯干) (W/kg)	局部暴露 SAR (肢体) (W/kg)
0.08	2	4

欧洲：CENELEC（欧洲电工标准化委员会）先后发布了 ENV50166-2：1995 ES 和 59005：1998 标准。这些标准均采用 ICNIRP 导则作为限值要求，对人体头部和躯干不大于 2W/kg，同时还针对特定产品给出了具体的测试方法。

日本：MPT（日本邮电部门）于 1994 年发布的射频辐射标准中的规定也与 ICNIRP 的相同，为 2W/kg。ARIB（日本无线电及商贸联合会）发布的测试标准：STD—T56：1998，则与 IEC（国际电工委员会）的要求相一致。

美国：美国国家标准 ANSI/IEEE C95—1：1992 中规定的对人体头部和躯干辐射限值标准为 1.6W/kg，计算依据是根据 1g 人体组织 30min 的平均值。IEEE C95.1-2005 是之前版本的修订版，该版本在修订时参考了一些其他国家现行标准，包括 ICNIRP 标准，该标准与 ICNIRP 的限值基本是一样的。

澳大利亚：澳大利亚辐射防护和核安全机构（ARPANSA）颁布了 ARPANSA 标准，规定了 3kHz~300GHz 的辐射频段内最大的辐射值，该标准是从比吸收率（SAR）的角度来规定手机的电磁辐射暴露限值的，其规定手机的 SAR 限值以 2W/kg 取代之前版本的 1.6W/kg。

加拿大：与美国相同，SAR 限值为 1.6W/kg。

1.2.2 中国对电磁辐射暴露量限值的规定

中国国家标准委员会于 2001 年 12 月 20 日正式成立。中国国家标准委员会发布的《电磁辐射暴露限值和测量方法》草案中规定辐射限值小于 2.0W/kg（10g 平均）。

1.3 世界国家和地区比吸收率测试要求

1.3.1 中国

为防止电磁辐射污染、保护环境、保障公众健康、促进伴有电磁辐射的正当实践的发展，中国于 1988 年制定了 GB 8702—1988：电磁辐射防护规定，该规定适用于中华人民共和国境内产生电磁辐射污染的一切单位或个人、一切设施或设备。该规定制定的限值为：职业照射，在每天 8h 工作期间内，任意连续 6min 按全身平均的比吸收率（SAR）应小于 0.1W/kg；公众照射，在 1 天 24h 内，任意连续 6min 按全身平均的比吸收率（SAR）应小于 0.02W/kg。为进一步加强电磁环境管理，中国于 2014 年发布了 GB 8702—2014，该标准整合了《电磁辐射防护规定》（GB 8702—1988）和《环境电磁波卫生标准》（GB 9175—1988），并参考了国际非

电离辐射防护委员会（ICNIRP）《限制时变电场、磁场和电磁场（300GHz 及以下）暴露导则，1998》，以及国际电气工程师学会（IEEE）《关于人体暴露于 0~3kHz 电磁场安全水平的 IEEE 标准》，考虑了中国电磁环境保护工作实践。该标准制定的公众暴露限值如表 1-2 所示。

表 1-2 公众暴露控制限值

频率范围	电场强度 E (V/m)	磁场强度 H (A/m)	磁感应强度 B (μ T)	等效平面波功率密度 S_{eq} (W/m^2)
1Hz~8Hz	8000	$32000/f$	$2\ 40000/f^2$	—
8Hz~25Hz	8000	$4000/f$	$5000/f$	—
0.025kHz~1.2kHz	$200/f$	$4/f$	$5/f$	—
1.2kHz~2.9kHz	$200/f$	3.3	4.1	—
2.9kHz~57kHz	70	$10/f$	$12/f$	—
57kHz~100kHz	$4000/f$	$10/f$	$12/f$	—
0.1MHz~3MHz	40	0.1	0.12	4
3MHz~30MHz	$67/f^{1/2}$	$0.17/f^{1/2}$	$0.21/f^{1/2}$	$12/f$
30MHz~3000MHz	12	0.032	0.04	0.4
3000MHz~15000MHz	$0.22f^{1/2}$	$0.00059f^{1/2}$	$0.00074f^{1/2}$	$f/7500$
15GHz~300GHz	27	0.073	0.092	2

另外，GB 1644.2—2011 规定了无线电设备 SAR 值的评估规程。为了确定被测设备最大的空间平均峰值，应该按照下列步骤在每一频段和工作模式下进行测量：

- （1）确定设备所有可能的测试情况，包括频率、工作模式等。
- （2）根据其不同情况，可以选择不同的简化测试方法进行测试。
- （3）按正确的配置方法对设备进行测试。

1.3.2 美国

ANSI/IEEE C95.1，该标准是 IEEE 制定的关于人体处于 3kHz~300GHz 的射频电磁场中的安全等级的标准。该标准规定，对操作频率介于 100kHz~300GHz 之间的可移动装置可以用 MPE 来取代 SAR 值的量测，限值如表 1-3、表 1-4 所示。

表 1-3 控制区电磁场最大允许暴露量（100kHz~300GHz）

频率范围 (MHz)	电场强度 E (V/m)	磁场强度 H (A/m)	功率密度 S (mW/m^2)	平均时间 (min)
0.1~1.0	1842	$16.3/f_M$	$(900,100000f_M^2)^b$	6
1.0~30	$1842/f_M$	$16.3/f_M$	$(9\ 000f_M^2,100000f_M^2)$	6
30~100	61.4	$16.3/f_M$	$(10,100000f_M^2)$	6
100~300	61.4	0.163	10	6
300~3000	—	—	$f_M/30$	6
3000~30000	—	—	100	$19.63/f_G^{1.079}$
30000~300000	—	—	100	2.524

表 1-4 公共区电磁场最大允许暴露量（100kHz~300GHz）

频率范围 (MHz)	电场强度 E (V/m)	磁场强度 H (A/m)	功率密度 S (mW/m ²)	平均时间 (min)
0.1~1.34	614	$16.3/f_M$	$(1000, 100000)f_M^2)^c$	6
1.34~3	$823.8/f_M$	$16.3/f_M$	$(1800 f_M^2, 100000 f_M^2)$	6
3~30	$823.8/f_M$	$16.3/f_M$	$(1800 f_M^2, 100000 f_M^2)$	
30~100	27.5	$158.3/f_G^{1.668}$	$(2,9400000 f_M^{3.336})$	6
100~400	27.5	0.729	2	
400~2000	—	—	$f_M/200$	6
2000~5000	—	—	10	6
5000~30000	—	—	10	$19.63/f_G^{1.079}$
30000~100000	—	—	10	2.524
100000~300000	—	—	$(90 f_G - 7\ 000)/200$	$5048/[(90 f_G - 700) f_G^{0.476}]$

注：SAR 限制值不适用于 6.0GHz 以上之操作频率，而 MPE 之功率密度限制值可应用，但距离发射装置为 5 公分或更远处。

FCC 47CFR 第二部分中规定，对操作频率介于 100kHz~6GHz 之间的便携式装置的 SAR 暴露极限如表 1-5 所示：

表 1-5 频率介于 100kHz~6GHz 之间的便携式装置的 SAR 暴露限值

全身平均“平均比吸收率”	部分躯体“平均比吸收率”	四肢头部“平均比吸收率”
(一) 职业性/受控环境		
0.4W/kg	10.0W/kg	20.0W/kg
(二) 一般民众/非受控环境		
0.08W/kg	2.0W/kg	4.0W/kg

注：① 全身平均，范围包含四肢头部之全部人体。

② 部分躯体，亦称局部比吸收率（Localized SAR），其平均范围为四肢头部除外之任一质量为 1kg 的立方组织。

③ 四肢头部系指手、手腕、脚和脚踝，其平均范围为任一质量为 10g 的立方组织。

ANSI/IEEE C95.3-2002 edition：该标准是 IEEE 推荐的人体暴露于 100kHz~300GHz 射频电磁场的测量和计算方法。

ANSI/IEEE P1528 标准中规定了 SAR 评估时的功率豁免限制。

FCC OET Bulletin 65 supplement C 是 FCC 规定的评估人类暴露于射频电磁场的指导方针。对于不同的行动电话装置标准规定了不同的测试方法和要求：对于可移动设备（Mobile device），若受测物于正常操作模式下，其发射机距离人体 20 公分以上者，可测试最大暴露允许值（Maximum Permissible Exposure, MPE）以证明其符合电波暴露量之要求；对于便携式设备（Portable device），若受测物于正常操作模式下，其发射机距离人体 20 公分以内者，须测试指定规范电磁波能量吸收比（Specific Absorption Rate, SAR）以证明其符合电波暴露量之要求。

1.3.3 欧洲

欧洲关于 SAR 标准的法规制定为：Cenelec EN50360/50361。

SAR 限制值为：根据国际非离子辐射保护委员会（ICNIRP）的规定为 2W/kg（10g 平均），见表 1-6：

表 1-6 时变电场和磁场基本限值

SAR limit (W/kg) 全身	SAR limit (W/kg) 10g, 头和躯干	SAR limit (W/kg) 10g, 四肢
0.08	2	4

1.3.4 其他国家

日本的 ARIB STD—T56 是与 SAR 相关的法规，其规定 SAR 限制值为 2.0W/kg（10g average），同欧洲的相关标准一致，该标准为非强制性标准。

韩国关于 SAR 标准的法规制定的测试方法接近美国 FCC，SAR 限制值同美国的 1.6W/kg（1g average）标准一致，该标准为非强制性标准。

澳洲关于 SAR 标准的法规制定为：AS/NZS 2772.1—1998，SAR 限制值同美国的 1.6W/kg（1g average）标准一致，手机辐射测试需强制性执行。

1.4 限值法规和测量标准

GB 21288—2007：《移动电话电磁辐射局部暴露限值》。

ANSI C95.1（1999）：《电磁辐射暴露安全标准（3kHz 至 300GHz）》。

IEEE C95.1（2005）：《电磁辐射暴露安全标准（3kHz 至 300GHz）》。

YD/T 1644.1—2007 手持和身体佩戴使用的无线通信设备对人体的电磁辐射—人体模型、仪器和规程—第 1 部分：靠近耳边使用的手持式无线通信设备的 SAR 评估规程（频率范围 300MHz～3GHz）。

EN 50360（2001）：《证明无线终端符合人体暴露于电磁场的基本限值的产品标准》。

EN 50361（2001）：《人体暴露于电磁场的比吸收率（SAR）测量的基础标准》。

EN 62209—1（2006）：《手持和身体佩戴使用的无线通信设备对人体的电磁照射—人体模型、仪器和规程—第 1 部分，靠近耳边使用的手持式无线通信设备的 SAR 评估规程（频率范围 300MHz～3GHz）》。

IEEE Std 1528（2003）：《与电磁能安全使用相关的产品标准》。

IEC 62209—1（2005）：《手持和身体佩戴使用的无线通信设备对人体的电磁照射—人体模型、仪器和规程—第 1 部分，靠近耳边使用的手持式无线通信设备的 SAR 评估规程（频率范围 300MHz～3GHz）》。

GB/T 28446.1—2012/IEC 62209—1：2005：《手持和身体佩戴使用的无线通信设备对人体的电磁照射—人体模型、仪器和规程—第 1 部分：靠近耳边使用的手持式无线通信设备的 SAR

评估规程（频率范围 300MHz~3GHz）》。

IEC 62209—1：2005 等同采用的国标是：GB/T 28446.1—2012。

IEC 62209—2（2010）：《手持和身体佩戴使用的无线通信设备对人体的电磁照射—人体模型、仪器和规程—第 2 部分，靠近人体使用的无线通信设备的 SAR 评估规程（频率范围 30MHz~6GHz）》。

第 2 章 比吸收率测量系统（DASY）

简介和应用

2.1 概述

本章以瑞士 SPEAG 公司 SAR 测试系统为例，其型号有 DASY5 SAR，DASY5 AIR，DASY5 PRO 或 DASY5 NEO，包括硬件组件及软件功能的介绍和使用说明。该系统是以硬件组件组成和软件功能特点进行区分，如图 2-1 所示。



图2-1

- DASY5 SAR 是最经济的方案之一。它能够完成标准手机 SAR 测试，并且完全兼容全球所有通信产品在耳边或身体近场（至体内小于 200mm）SAR 测试标准。DASY5 SAR 的优化程序符合按照任何国际标准和国家标准对 SAR 预测试和一致性测试的要求。
- DASY5 AIR 也是经济的方案之一。依据 IEEE C95.3，EN 50392，EN50357 等标准，可验证手机的 MPE 值（IEEE C95.1）和导出的极限值（按照 ICNIRP 标准要求）。

- DASY5 PRO 是综合了 DASY SAR 和 DASY AIR 参数的更全面的系统。用户可用该系统执行所有无线通信近场扫描任务, 同时也可完成助听器极限值及自由空间的分析测试和优化。预定义软件程序支持所有标准测试。
- DASY5 NEO 是完全开放的系统, 能满足所有当前和将来在近场扫描领域的需求, 其提供了 DASY5 PRO 全部功能, 集成了第三方设备与 SPEAG 公司场强探头。硬件可扩充为 8 路模拟输入 (16 位, 同步采样率 250kSps), 8 个数字 I/O (TTL) 和两个 24 位接口。有特别要求的不同等级 I/O 信道或不同采样率信道也可被整合在系统上。该测量系统有 GPIB, USB 或以太网控制接口, 便于和第三方设备兼容。可编写 Python® 脚本语言命令用这些端口与 DASY5 PRO 通信, 无需进行低级程序语言编程。用户定制的板卡也可通过插入模块的方式连接到系统。所有采集的数据可被保存为 DASY5 文档。也可将结果文件导入 SEMCAD X 或导出到 MatLab 或 Mathematica 进行评估。

2.2 硬件组件

2.2.1 系统硬件组件

DASY5 系统硬件组件主要是: DASY5 测量服务器、数据采集单元 (DAE)、场强探头 (Probe)、激光束单元 (Light Beam Unit)、组织模拟液 (Medium)、SAM 双半头假人模型 (SAM Twin Phantom)、被测样机夹具, 以及电介质测量套件 (DAK)、系统验证用套件等。

2.2.2 DASY5 测量服务器

DASY5 测量服务器基于 PC/104 主板, 配备了 400MHz intel ULV Celeron 处理器, 有 128MB 硬盘和 128MB 内存。还有 DAE4 (或 DAE3) 的数据收发与通信模块, 以及光信号 16 位模数转换器。数字 I/O 接口都在 DASY5 I/O 板上, 直接连接到 CPU 板的 PC/104 总线。

测量服务器记录场测量实时数据、评估假人表面探测数据、控制机器手臂运动, 以及处理安全保护流程。操作员计算机操作系统不会影响上述这些实时关键任务。所有的连接都由看门狗监督, 当测量服务器上有任何线缆中断时, 测量服务器将自动卸载机器手臂供电, 停止所有程控的机器手臂运动。此外, 测量服务器具有扩展插槽, 为潜在应用保留了升级。应注意, 扩展插槽并非标准引脚排列, 只为连接 SPEAG 公司提供设备预留, 插接其他厂商设备可能会对测量服务器严重损害。测量服务器无须校准。

1. DASY5 测量服务器背后各电缆连接端口

- (1) CTRL: 机器手臂安全接口。连接到 CS8C 机器手臂控制器 J109。
- (2) Dig In: 基本输入。连接到 CS8C 机器手臂控制器 J602。
- (3) Dig Out: 基本输出。连接到 CS8C 机器手臂控制器 J601。
- (4) Door Contacts: 此接口用来连接额外的安全保护设备, 如光幕, 地垫开关, 门开关等。若不使用上述安全设备, 必须为该接口提供一个短路接插件。
- (5) Emergency Stop: 连接到远程控制盒。
- (6) Signal Lamps: 连接信号灯。

(7) Light Beam: 连接到激光束单元。

(8) DAE: 数据连接。连接到机器手臂上的光电转换型数据采集单元 (DAE4 或 DAE3)。线缆连接到机器手臂后部面板上。

(9) COM1: 第一个串行端口。该端口尚未在 DASY5 使用, 为将来应用保留。

(10) COM2: 第二个串行端口。该端口尚未在 DASY5 使用, 为将来应用保留。

(11) USB: 该连接器仅被 SPEAG 公司员工使用。用于安装和高级故障诊断。

(12) 以太网接口: 共有三个网口, 任何一个均可用于连接到操作员计算机, 可使用双绞线网线, 测量服务器与计算机之间连接方式必须是点对点。第二个网口连接到测量控制器 CS8C。该网口可使用双绞线网线, 且必须是点对点, 中间无需交换机或集线器, 否则无法保证通信时延。第三个网口为将来应用保留, 不要使用该网口。

(13) 扩展插槽: 扩展插槽未在 DASY5 使用, 为将来应用保留。

(14) 服务器前面的接口只适用于 SPEAG 公司或其代理商, 用于安装和高级故障诊断。

2. 远程和本地操作

当机器手臂控制器电源接通, 测量服务器就会自动开启。远程开关通过机器手臂控制器与测量服务器 CTRL 插槽连接实现, 由 REMOTE LED 指示。然而, 当机器手臂控制器关闭时, 测量服务器可在本地模式下运行。此功能在无须使用机器手臂测量的场合里很有用, 且有助于故障诊断。为使测量服务器在本地模式运行, 将测量服务器前面板右侧电源开关状态设置为 LOCAL, LOCAL LED 将点亮。在 DASY 系统正常使用下, 不要使用电源开关, 仅使用远程开关。

3. 电源

测量服务器内部有 100W 开关电源, 产生 5V 和 24V 直流电压。允许市电输入, 交流电压范围 88V~263V, 频率 47Hz~63Hz。

4. 保险丝

电源连接器内部有两个 5A 主电网保险丝 F1 和 F2。此外, 测量服务器背面有四个内部供电用保险丝, 其中, F3 和 F4 是 5A 保险丝, 对应 $\pm 12\text{V}$ 直流供电。F5 是 6.3A 保险丝, 对应 5V 直流供电。F6 是 1.6A 保险丝, 对应 24V 直流供电。

2.2.3 数据采集单元 (DAE)

如图 2-2 所示, 数据采集单元 (DAE4 或 DAE3) 包括一个高灵敏度自动归零放大器, 一个通道和增益切换多路转换器, 一个快速的 16 位 AD 转换器和指令译码器控制逻辑器。DAE4 以及 DAE3 输入阻抗是 $200\text{M}\Omega$ (输入对称), 共模抑制比高于 80dB, 通过光纤下行传输数据到测量服务器, 上行传输命令至场强探头安装机械的传感器, 用于仪器表面检测。机械探头安装的设备包括正面和横向探头接触点, 这里面有两种不同的传感器系统。它们分别用于假人模型表面探测和探头头部碰撞检测。

双光学电缆连接 DAE 到机器手臂上的光电转换器 (EOC)。内部数据连接从 EOC 传到机器手臂后面板, 以一条 10m 长的电缆连接到测量服务器的 DAE 输入。

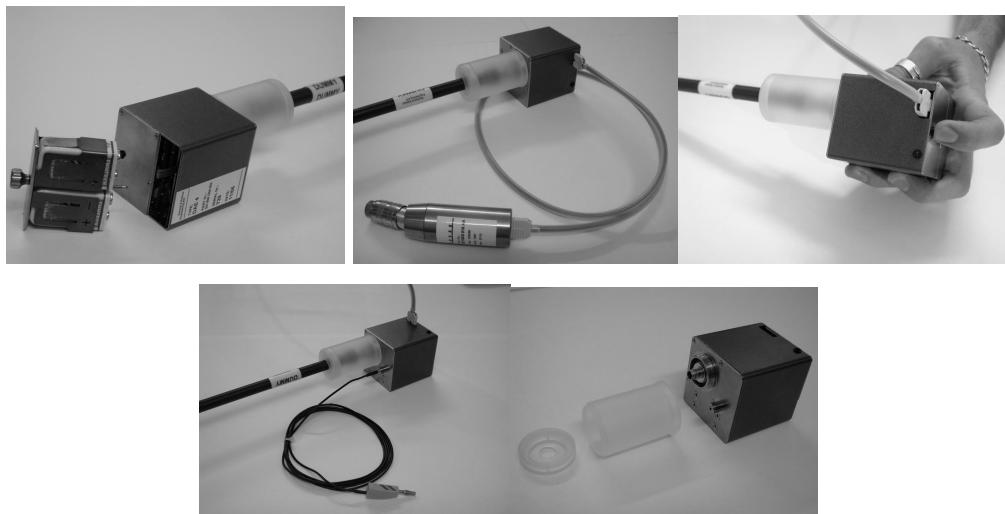


图 2-2

由于高阻抗，如果输入保持开通，偏移电压可能造成漂移零点几个微伏。若要充分发挥 DAE 高灵敏度，实验室规划适当的接地和电源分布系统是降低系统噪声的必要手段。DAE 需要保持干燥，避免水气在 DAE 盒体内凝结。

DAE 可用标准 9V 电池或两个 9V 充电电池（实际上是 8.4V 或 9.6V）。在制动或测量过程 DAE 未使用时，其会自动关闭电源。电池一个工作周期取决于系统的使用，一般是采集数据 >10h。若近期不打算使用 DAE，应取出电池。强烈建议使用充电电池。在有些国家如美国市售 9V 充电电池的额定电压是 7.2V 而不是通常的 8.4V。DAE 可使用 8.4V，最好是 9.6V 充电电池，在 7.2V 下可能会出现低电量警告。

按下 DAE 上按钮的顶部（约 1s）可开启电源。按下超过 2s 以上，DAE 会关闭电源。关闭机器手臂控制器和测量服务器 15min 后，DAE 会自动关闭。

DAE 底部的固定脚用于安装在机器手臂上的固定点，可用于安装时在手臂支架上的定位，这对场分量测量很重要。它也可以作为接地引脚，将 DAE 与辐射源共地，降低系统噪声。

2.2.4 场强探头

SAR 测量系统 DASY 系列可支持多种不同类型的场强探头。

比吸收率探头：这类探头是设计用在高介电常数的液体中。比吸收率探头在不同频率的各种组织模拟液中校准。由于在空气中的球面各向同性较差（ $\pm 2\text{dB}$ ），所以不宜于在空气中使用。

自由空间探头：是专为测量自由空间电场和磁场的探头。 z 传感器与探头轴线对齐， x 传感器的旋转角度是被指定的，这样可以允许 DASY 系统在近场测量时自动对齐探头网格。自由空间探头一般不在液体中校准。磁场探头可以在液体中使用，且不须改变参数。

温度探头：温度探头用于一般温度测试。用温差特性来评估 SAR，参数设定和评估程序与相应的场强探头完全不同。

音频探头：AM1D 探头是有源探头，以一个单一传感器对轴向和径向进行测量扫描，测试音频频带磁场信号；其依据为 ANSI C63.19 标准，AM1D 探头可完全屏蔽射频信号。

光学表面探测探头：有些探头有内置光学表面检测系统。这种探头主要用在灌满组织模拟液的假人模型中测量。请注意，这需要使用在 EOC 61/91 材料且表面是白色的假人模型中。

为维持探头寿命须注意如下事项。

- 小心处理探头，在不使用时放置于安全的地方。
- 在新人培训和尝试新的设置时，应使用仿真探头。
- 比吸收率探头在液体中使用后，及时用清水清洁，用柔软的毛巾或纸巾将表面擦拭干。切勿将刀具或硬质物品接触到探头头部。
- 不允许将聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）外壳的透明探头置于有机溶剂中，包括以二乙二醇单丁醚（DGBE）为基底的液体。由黑色不透明聚醚醚酮（PEEK）外壳保护的探头可用在大多数溶剂或酸碱水溶液中。
- 切勿尝试打开探头，否则会失去校准或损坏探头。

探头头部的精确定位对于准确性和高重复性非常重要，前提是稳定地安装探头。为了避免探头头部被碰损坏，探头安装为弹性可动的。通过用一个塑料套管和硅环来固定探头的中心轴，使用精密连接器及一个额外的支架安装探头。在 DAE 内的连接器可伸缩，以该方式安装可利用磁铁和弹簧保持探头定位。转换系统中的连接器安装了检测探头正向和侧向碰撞的功能，触发必要的软件响应，实现探头碰撞的检测。这样使得探头即使是在水平排列的情况下，亦可保证 0.1mm 定位精度，允许在不损坏探头的前提下做 2cm 的轴向运动和 5cm 的横向运动。除了保证探头安装的绝对准确性，此外使用激光束做校准，准确地将探头头部对准到手臂坐标系统。

硅环中心应确保与探头中轴重合。若未置于中心，可松开硅环支架，重新定位硅环。对于光学表面检测探头，必须从连接器端推动探头塑料管，而其他探头可以从顶端推出塑料管。

如图 2-3 所示连接探头（为避免掉落，请放在桌上安装）。连接器有一条线，可确保正确对准。如果没对准，连接环仅可转一圈且探头会呈现角度弯曲。如果连接硅环有问题，可将连接器完全推入 DAE，然后再试一次。不可转动探头，只可转动连接环。若转动探头，DAE 探头连接器内的引脚可能会断裂。固定探头塑料管，然后将 DAE 安装到机械手臂上的 DAE 支架，将 DAE 底部的接地引脚插入黑色的摇篮孔中。不可蛮力将连接器连接到一个不正确的位置。



图 2-3

2.2.5 近距离传感器

吸收剂量探头如 ET3DV6 类型都配备了光纤线缆, 该线缆被连接到机器手臂上的 EOC (EOC 规格必须为 61/91 型), 并提供模型表面自动检测功能。光纤线缆一端连接到脉冲红外发射器, 另一端则连接到同步接收器。如果探头接近某个表面, 从该表面产生的反射耦合到接收光纤, 且反射会从接近处逐渐增加, 直至最大, 然后逐渐减小。若探头垂直接触表面, 耦合是零。某个表面产生耦合的最大距离与表面反射率以及表面到探头的角度是独立的。近距离传感器工作在表面确认过程时, 其信号是 16 位 AD 转换值 (0~65535)。DASY5 软件读取接近该表面时的反射, 并且找到最大的二阶拟合, 当达到最大值时, 探测则会停止。

光学表面检测在透明液体情况下, 反射面重复性优于 0.1mm, 最大距离取决于光纤及其周围电介质, 电介质是指组织模拟液。该距离通常是 1.0~3.0mm。注意: 光学链路的连接器有一个凹口, 请确保它被正确地定位和固定, 探头每次从组织模拟液中移出后, 都要清洗探头端部。在系统安装过程中, 近距离传感器的灵敏度已被设定, 所以即使在高反射表面, AD 转换值也不会超载, 且信号强度足以避免噪声问题。在空气中白纸的最大反射下, 为达到敏感度最佳, 将 AD 转换值设置在 30000~50000 范围内。在以蔗糖为主的组织模拟液环境中, 典型的 AD 转换值设置在 10000~25000, 若 AD 转换值不在此范围, 需改变敏感度设定。

2.2.6 激光束单元

如图 2-4 所示, 激光束单元用于自动进行探头定位对准的工具。通过激光束进行定位对准过程, 可测量得出探头头部与机器手臂的相对位置, 包括探头长度及探头水平偏移量。一旦机器上的探头头部坐标不合理, 软件会修正所有动作。该流程的定位重复性是小于 0.1mm, 即某个位置已经通过探头定位, 则使用另外一只校正过的探头, 定位也会得到相同的位置, 即使是不同的朝向, 误差也在 0.1mm 以内。在探头旋转时, 探头头部将保持在给定的位置不变。



图 2-4

安全指南: 激光束单元包含一个符合 IEC 60825—1: 2007 规定的可见光激光源, 其输出端激光波长为 670nm。考虑到眼睛的安全, 功率小于 0.2mW, 对人眼安全定在等级 1 的安全范围内, 等级 1 的激光产品可以被安装在非专业的工作场所, 该光束的自然暴露不会造成视网膜永久伤害。当人眼无意接触到该级别的激光时, 人眨眼的条件反射足够快, 可避免有任何损害, 但如果刻意裸眼长时间直接接触则可能造成伤害, 不过这完全可以避免。

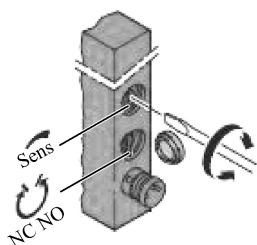


图 2-5

如图 2-5 所示为设置激光束, 可通过敏感度分压计去调整敏感度 (Sens), 通常将其调整到中间的位置。旋转开关可以选择输出功能 (NC NO), 开关必须设置在 NC 位置。开关在中间位置, 会导致输出状态视为未定义。为了防止意外关闭, 使用橡胶套从外将它盖住。安装时, 首先确认激光束单元上所有的警告 (Warning) 卷标, 包含激光警告卷标、类型卷标及等级防护。按规定, 由技术熟练的人员在断电且机器关机的状况下进行激光光栅的装备和电气连接, 事先必须确认机器不会上电。

激光束单元安装在相对于机器手臂的固定位置, 且必须便于让垂直的探头可安全地进入。针对机器手臂 TX60L 的 SAR 或 PRO 系统, 可安置在机器背面的某一角落。针对 TX90XL 的 DASY 5 系统, 激光束固定臂挂载一特殊夹具, 用其将激光束托高。针对第三方出产探头所设计的激光束单元, TX90XL 或 RX160L 的 DASY NEO 系统的夹具可能被安装在手臂附近不同位置。各类型 DASY 系统都包含了激光束单元, 在装机过程中一并安装。

激光束单元的验证: 机器手臂控制器上的数字输出控制了激光束单元, 可使用手动开关进行验证下列功能是否正常。在机器手臂手工控制手柄 (MCP) 菜单里面, “上” 和 “下” 键是浏览功能, “左” 键是退出, “右” 键是进入该功能。停止运行中的 DASY 系统, 在 MCP 上选择手动模式, 在 MCP 里选择 Controller Panel, 选择 I/O, 选择 Controller, 选择 Basic IO output, 将位 0 从关改成开, 按下 F6 确认, 即可使激光束单元开启且亮起黄灯。关闭激光束单元, 将位 0 再一次关闭。

软件安装: 在完成机器安装后, 激光束单元的位置必须安装在软件里面。当用户录入一个新机器型态档案时, 该过程也需重新操作一次。在机器手臂没有任何故障的情况下, 在激光束单元中的两点及旁边一点完成定位后, 可在软件中选择自动辨识激光束单元的程序。

2.2.7 组织模拟液

组织模拟液的介电特性依赖于工作频率 (单位: Hz)。人体组织有复杂的细胞结构, 其介电特性对频率的依赖不同于组织模拟液这种均质液体。由于配制的每种溶液只可在某一局部频带里模拟人体组织介电特性, 因而需要用多种不同成分的组织模拟液分别在不同频带实现人体介电特性的模拟。目前各个 SAR 测量标准给出的组织模拟液配方, 仅可适用于在目标频率 5%~10% 范围窄频带 (可用频带宽度随频率升高而降低) SAR 值的测量。组织模拟液在使用过程中需经常重新测量其介电参数。场强探头的转换因子、边界补偿因子依赖于频率和液体介电参数, 每个场强探头须定义许多不同组合的转换因子、边界补偿因子设置, 每组因子设置对应于不同的工作频率、组织模拟液相对介电常数和电导率。

组织模拟液的参数针对不同频率有不同的定义及其一致性标准 (如 IEEE 1528—2003, IEC 62209—1)。有多种测量系统可用来测量液体介电参数: ①开口同轴测试法易于使用, 通过开路、短路、匹配三负载完成校准; ②传输线法测量充满液体的高精度同轴线的传输和反射, 它需要双端口校准, 但比开口同轴法更准确, 产品有 DAMASKOS 公司的 Model 1500T; ③反射线法测量充满液体的短路线反射, 但此方法灵敏度低, 不适用于组织模拟液测量; ④槽孔线法扫描填充液传输线的场强及相位, 只需要简单的响应校准, 该方法非常准确, 但

只适合在 100MHz~200MHz 高损耗液体中使用,而且清洗残液非常烦琐。上述方法都使用了网络分析仪。测量液体介电常数作业过程中,液体参考面上不可出现气泡,由于液体的参数与温度有关,在测量过程中不能改变液体的温度。

由于不可能使用单一配方的组织模拟液覆盖所有频段,且在不同频率组织模拟液具有相应的介电目标值,因此须使用不同的制备配方。在权威的 SAR 测量标准(如 IEEE 1528—2003, IEC 62209—1 附录中)可查找在不同频段相应的混合物组成和配比。在 1GHz 以下频率范围典型配方是蔗糖水溶液;在 1GHz~3GHz 典型配方是聚氧乙烯失水山梨醇单月桂酸酯(POEM)水溶液或二乙二醇丁醚(DGMBE)水溶液;在高于 3GHz 频段的配方是基于油脂的液体。下面分别介绍这三种配方。

- **蔗糖水溶液:**基本思路是用蔗糖降低水的相对介电常数,用食盐(NaCl)增加电导率。但蔗糖水溶液浓度提高也会导致电导率增高。相对介电常数和电导率与频率有关,此外随着水溶液温度变化,相对介电常数和电导率也会出现高达每摄氏度 2% 的变化, SAR 测量标准给出的大多数配方都是在 22℃ 调配。另一方面,若液体长时间没有加盖封存而导致水蒸发也会改变液体成分及参数,需加入去离子水(蒸馏水)。通常要留有足够的裕量将蔗糖水溶液的相对介电常数和电导率调整到初始值。搅拌过程建议使用玻璃容器、炉具、电磁搅拌器,它们都是化学实验室标配设备。在水达到温和的状态下加入食盐,添加纤维素、杀菌剂。在制备蔗糖水溶液过程中,溶解蔗糖需要较长的搅拌时间,最好保持较高水温搅拌,但期间可能会有水份蒸发,可事后添补水。配方比例微调后,需要重新测量相对介电常数和电导率,增加食盐虽然可能使电导率增大,但对相对介电常数的影响有正有负。
- **二乙二醇丁醚(DGMBE)水溶液:**基本思路是在水中加入有机溶剂以降低水的相对介电常数。可按相对介电常数和电导率规格需要,调配水、DGMBE、食盐的配比,虽然该混合物毒性低,但在实验室内,仍然有必要保障空气流通。由于 DGMBE 是一种塑料软化剂,且能够持续地影响塑料材质,因此需要合适的贮存容器。制备过程需要炉具、电磁搅拌器等标准的化学实验装置。建议先加水,再对水预热,在温和的水温下加入 DGMBE 和食盐。贮存容器必须加盖防止蒸发,如果需要持续加热,需保证溶液温度在沸点以下。需要注意,不可使用透明有机玻璃外壳(例如聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA))的探针浸入 DGMBE 水溶液,需要使用耐受 DGMBE 的外壳材料(例如黑色的聚醚醚酮(PEEK)树脂外壳)。假人模型内不应长期放置 DGMBE 水溶液类型的组织模拟液,每次使用完毕,假人模型要使用清水清洁并保持干燥。
- **聚氧乙烯失水山梨醇单月桂酸酯(POEM)水溶液:**POEM 这种溶剂常用在食品工业,相应的溶液物理性质类似于蔗糖水溶液。POEM 水溶液的制备与蔗糖水溶液类似,需要加入防腐剂防止细菌及真菌产生变质,最终得到的是浅黄色透明的溶液。溶液蒸发的水在添补后,主要会增加相对介电常数,而对电导率的影响较小。相对介电常数和电导率与液体类型和频率有关,需要注意在较高频率时,测量的不确定度趋于增加,尤其是电导率。
- **基于油脂的液体:**这类液体是一种复杂混合成分的乳化剂,其外观在大多数情况下呈现为黄色或棕色透明或略不透明的乳白色。早期的该类组织模拟液在久置后浅层会呈现不透明的奶油色,一些液体长时间不使用会产生油水分离,所以使用前或处理废液

时需要搅拌使其均匀。该组织液呈现不透明是正常的，只要是混合均匀，则不会影响介电常数。蒸发的水在添补后会增加溶液的相对介电常数，对电导率的影响较小。需要注意的是在高频率时，测量的不确定度增加，尤其是电导率。当贮存容器或假人模型的开口与空气大面积接触的情况下，将会导致溶液水分蒸发，含水量流失。建议将溶液贮存在密闭容器中，放置在光线暗环境。贮存温度在 $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ ，避免冷冻和 25°C 以上较高温度。在 15°C 以下较低温度，溶液会呈现不透明；当这类乳剂溶液置于较高温度，其混合成分不在稳定，层状分离，上层油脂状，中层乳白色，下层透明，伴随溶液温度下降到正常工作温度（如 22°C ），混合物重新恢复成乳白色，并重新混合均匀，呈现出透明状。因此，当这类油水混合物因加热出现组织模拟液成分分离时（呈现不透明或乳白色分层），将加热后的液体进行搅拌或振动的同时冷却至 5°C ，并持续保持若干小时，之后置于温度高于 15°C 的实验室环境进行自然升温，重复该过程若干次，直到液体呈现透明状，即重新混合均匀。这类组织模拟液在使用过程中需要经常性地搅拌，当长时间在空气中暴露，假人模型和空气接触面上的溶液会出现沉积凝胶状，须用塑料刮刀将凝胶物重新混合到液体中，令其充分溶解。类似的处理适用于在场强探头外壳上沉积的凝胶物。清洗假人模型时，在肥皂水清洗前先用纸巾擦拭残留组织模拟液。不宜将该类组织模拟液直接弃置到生活环境中的下水道、废水池。

2.2.8 SAM 双半头假人模型

SAM (Specific Anthropomorphic Mannequin) 双半头假人模型如图 2-6 所示，其具有 2mm 厚玻璃纤维外壳（不包括厚度增加到 6mm 的耳朵区域）。该假人模型包括三个可用于 SAR 测量的区域，分别是左耳、右耳以及平坦假人区域。

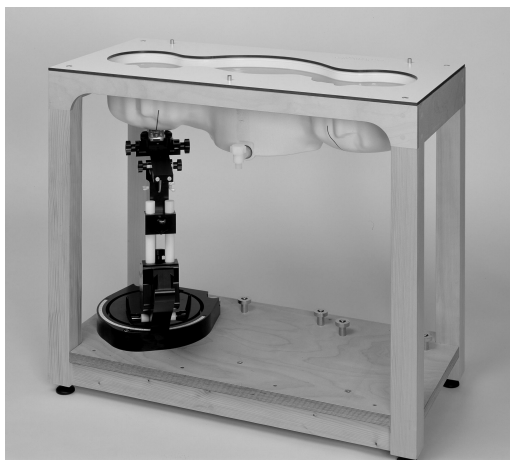


图 2-6

在 DASY5 系列 SAR 测量系统中，和机器手臂 TX90XL 及 RX160L 型号配套的假人模型支撑桌长宽高尺寸大小是 $100 \times 50 \times 85$ （单位：cm）和机器手臂 RX60L 型号配套的支撑桌长宽高尺寸大小是 $100 \times 75 \times 91$ （单位：cm）。支撑桌为了可安装和固定机器手臂，加强了结构设计。四角脚架能方便桌台移位。底板上安置了三双螺栓用于锁定被测装置的支架，以便于支架可被分别调节到三块 SAR 测量区域的标准测量位置。SAR 测量中若使用两个假人模型

（分别放置不同频段组织模拟液），只需配备一个支架即可。假人模型配备了白色长方形塑料盖板，用于防止水分蒸发，避免改变组织模拟液参数，在实验结束后压盖在假人模型开口面上。若需开展在自由空间被测装置的测量，塑料盖板可形成平坦宽阔的桌面为测量提供很大便利。在假人模型边缘有三个参考标记，用来确定假人模型的绝对位置，以训练机器手臂在开展测量前记忆 xyz 坐标系。在该假人模型中使用组织模拟液时需要注意。

① 基于蔗糖水溶液的组织模拟液可在假人模型中永久放置，但要记得在非测量期间加盖板，否则水分会蒸发，影响组织模拟液的相对介电常数。

② 基于二乙二醇丁醚（DGMBE）水溶液的组织模拟液应当小心使用。由于 DGMBE 对大多数塑料有软化作用，每次结束 SAR 测试的时候组织模拟液应收回，将假人模型内清洁干净后保持干燥。

③ 请勿在假人模型中使用未经过塑料材料测试的有机溶剂。

2.2.9 ELI4 假人模型

ELI4 假人模型设计用于手持或与身体穿戴无线装置的合规性测试，如图 2-7 所示，其工作频率范围是 30MHz 到 6GHz。ELI4 完全兼容 SAR 测量标准 IEC62209—2 草案以及所有已知的组织模拟液。ELI4 假人模型还针对性能进行了优化，可安置在 SPEAG 公司的标准桌台内。

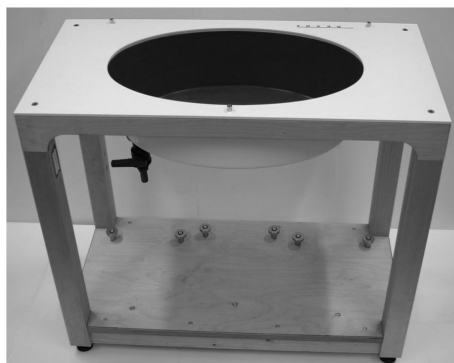


图 2-7

ELI4 假人模型使用组织模拟液的注意事项与 SAM 双半球假人模型相同。

① 基于蔗糖水溶液的组织模拟液可在假人模型中永久放置，但要记得在非测量期间加盖板，否则水分会蒸发，影响组织模拟液的相对介电常数。

② 基于二乙二醇丁醚（DGMBE）水溶液的组织模拟液应当小心使用。由于 DGMBE 对大多数塑料有软化作用，每次结束 SAR 测试的时候组织模拟液应收回，将假人模型内清洁干净后保持干燥。

③ 请勿在假人模型中使用未经过塑料材料测试的有机溶剂。

2.2.10 手机夹具

假人模型内的 SAR 值与信号源和液体表面间距离的平方成反比。若信号源相距 5mm，其摆放误差值达到 $\pm 0.5\text{mm}$ （即 $\pm 10\%$ ）将可能使得 SAR 值产生 $\pm 20\%$ 的不确定度。因此被测装置（例如手机）进行准确地放置定位对于 SAR 值测量的准确性和可重复性至关重要，被测

装置放置的位置在相关测量标准中已做出了明确定义。

对于 DASY5 系列 SAR 测量系统，被测装置夹具如图 2-8 所示，在设计上可通过角度调节满足不同 SAR 测量标准规定的摆放位置。夹具有两个轴，分别实现被测装置的旋转（相对于身体轴）和倾斜（相对于耳朵参考点之间的连线）。这两个轴的旋转中心都是耳朵参考点。因此，当转角改变时被测装置不需要重新摆放。



图 2-8

DASY5 系列 SAR 测量系统夹具的选料使用低损耗的聚氧亚甲基（POM）塑料，其相对介电常数 $\epsilon=3$ ，损耗正切 $\delta=0.02$ 。由于考虑到尽可能地降低测量夹具对测试结果的影响，介质材料的用量已降至最低，只紧贴在被测装置周边。

被测装置（DUT）的摆放有如下操作事项。

1. DUT 的标记

目标：用色带标示 DUT 放音孔和装置中心线，这样可使 DUT 中心与 SAM 假人耳朵参考点更容易相互重合。

推荐程序：（1）用一条色带穿过 DUT 宽边中心，标出一条从头到尾的线，这条线作为 DUT 的中心线，如图 2-9 所示。

（2）确定 DUT 的放音孔位置。如果 DUT 有多个放音孔，确定所有放音孔的中心，将其作为放音孔位置。使用另外一条色带穿过放音孔位置，并垂直穿过中心线色带，如图 2-10 所示。



图 2-9



图 2-10

2. DUT 的安置

目标：将 DUT 安装在夹具上，将 DUT 在夹脚之间稳定固定，使 DUT 平行摆放在夹具面上，使得对辐射特性的影响降至最小，如图 2-11 所示。



图 2-11

夹具组件描述：

如图 2-12 所示，DUT 是翻盖手机样品，实际不同样品长短不一致，首先要了解夹具各个组件的各种可调节姿态。各调节螺栓的号码已在图中分别标示。

DASY5 系列 SAR 测试系统的夹具有好几处机械设计改进。夹脚带有弹性夹，这一特征更适应 DUT。通过在侧面拉出细轴，使得夹脚打开和闭合更加方便，更容易将夹脚朝需要的方向滑动，并朝下压按夹脚即可将其锁定，如图 2-13 所示。

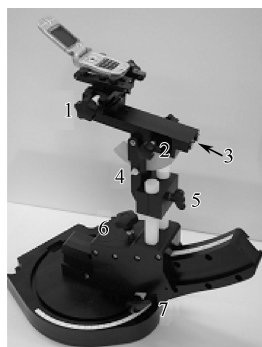


图 2-12



图 2-13

整个夹脚通过可拉起中心插梢分解，重新安装夹脚时，将其放到初始位置，插上中心插梢，如图 2-14 所示。



图 2-14

拧紧/松开 DUT 分别是通过顺时针/逆时针转动一号螺栓实现。橡胶塞可被定位在各个不同位置上，橡胶塞在位置选择上需要注意不能影响待测物按钮或连接器的位置。为降低对辐射特性的影响，天线及所有辐射组件应当尽量远离支架。



图 2-15

二号螺栓用来放松滑块闸，进行向前向后定位。仅需转动九十度即可完全松开滑块闸。若调节距离仍然不足，夹脚支架在滑块上还有两处安装位置，可进一步增加调节量。朝一个方向扩增 20mm 滑动距离，拔出滑块下部的三号螺栓，可将夹脚支架卸下，并将其安装在其他可能的位置上，如图 2-15 所示。

四号螺栓可用来调节 DUT 摆放角度。六号螺栓也可用来完成这样的调节。两个螺栓可同时调节，以增加 DUT 与耳朵参考点间更多可能的位置和角度，如图 2-16 所示。

五号螺栓用来调节 DUT 支架的升降位置，如图 2-17 所示。建议先将上部的重量支撑住，再松动该螺栓。

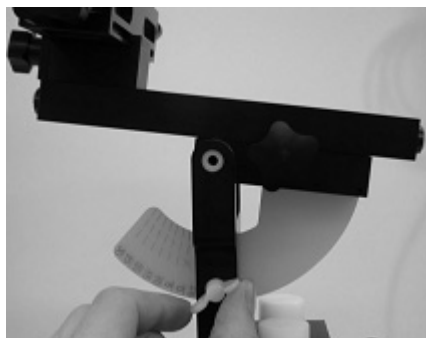


图 2-16

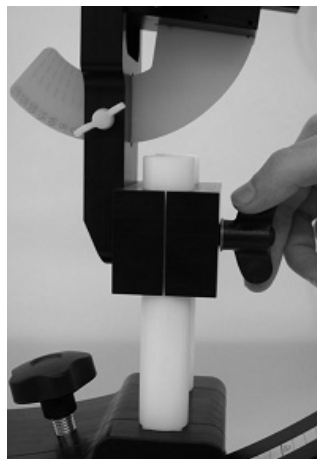


图 2-17

六号螺栓用于 DUT 角度的粗调，四号螺栓用于微调，如图 2-18 所示。

七号螺栓是水平调节的刹闸，松开刹闸可调节 DUT 的水平角度，可用来调整 DUT 放音孔位置，以匹配假人模型的右耳或左耳位置，如图 2-19 所示。

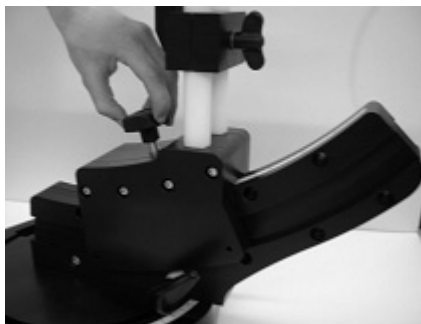


图 2-18



图 2-19

安装 DUT 的推荐程序。

- ① 降低夹具高度，大约比耳朵参考点低 50mm。
- ② 调整主仰角至大约 80° ，且调整上部的辅仰角至大约 -10° 。
- ③ 调节水平角指示在大约 59° 。

④ 将 DUT 的最下部安装在夹具夹脚处，使得电波辐射区域能尽量远离滑块。根据 DUT 的几何形状，安装位置必须同时可满足能够调节贴靠脸颊和倾斜离开脸颊这两种姿态（在 DUT 垂直面内可实现 15° 倾斜）。

⑤ 固定 DUT 应使其中心线或其他便于识别的位置线与两夹脚连线对齐，且尽量处于在夹脚钳中心。夹脚钳至 DUT 端部间距基本相同。

注意：① 在改变 DUT 角度前，应先降低夹具高度。

② 如果改变 DUT 角度后 DUT 有水平移动，则表明 DUT 或者夹具没有被正确定位。

3. 调整 DUT 在脸颊的贴靠位置

目标：在脸颊位置，DUT 的放音孔应该在耳朵参考点下方，且 DUT 的中心线必须与左耳/右耳和嘴巴之间连线相互一致，DUT 应该和假人模型有两点碰触。

推荐程序。

- ① 为了可额外的调节出 15° 倾斜角度，主仰角不得超过 85° 。
- ② 调节 DUT 高度到刚好碰到假人模型参考线。
- ③ 调整垂直和纵向位置和主仰角，使 DUT 和假人有两点接触。
- ④ 细调方向角，使 DUT 中心线和假人模型平行。
- ⑤ 细调垂直位置和纵向位置，固定仰角，使放音孔和左耳/右耳位置对应重合，并触碰脸颊位置。
- ⑥ 用夹具新的功能细调横向位置使 DUT 的中心线位于参考线下方，为此将夹具的两个固定螺栓转动同样的角度。

4. 调整 DUT 倾斜位置

目标：在倾斜位置，DUT 放音孔应在左耳/右耳参考点下方，DUT 中心线必须与耳朵和嘴巴之间的参考线相重合。DUT 应与耳朵单点接触，并垂直倾斜 15° 。

推荐程序。

- ① 读取主仰角度数。
- ② 降低支架的垂直位置，主仰角增大 15° ，将此角度固定。
- ③ 夹具垂直地调节，直到相互触碰到。

为了额外的倾斜角 15° ，主仰角不得超过 85° 。

④ 如果 DUT 中心线在靠近耳朵处未在耳朵下方，可在夹钳旁边水平调节（将夹具两个固定螺栓转动同样的角度）。

2.2.11 笔记本电脑夹具

在 SAR 测量中，为满足尺寸较大的 DUT 的安装和固定。2007 年 10 月 SPEAG 公司发布了结构简单有效的夹具扩展件，依据 IEC 62209—2 满足针对笔记本电脑、数码相机等 DUT

的测试要求。该夹具扩展件使用聚甲醛（POM）塑料、PET-G（1, 4-环己烷二甲醇）丙烯酸玻璃以及泡沫塑料制作，如图 2-20 所示。笔记本电脑夹具扩展件其底部可直接固定在与手机夹具上方，可用于 SAM 双半头假人模型和及 ELI 系列假人模型。

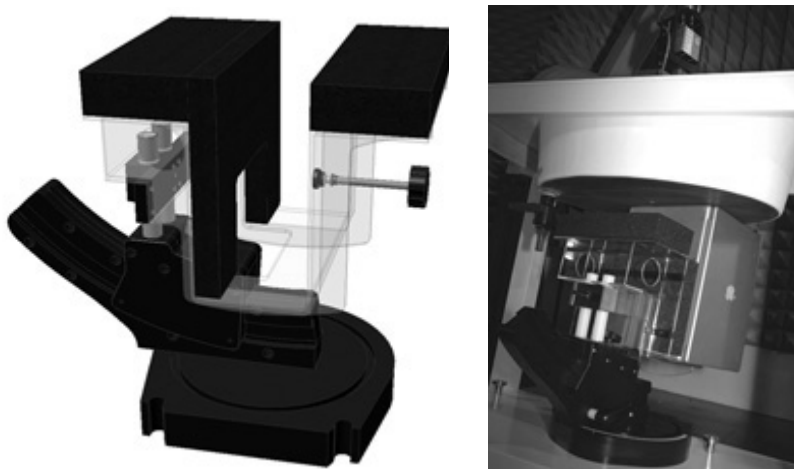


图 2-20

如何架设笔记本电脑夹具。

以被测笔记本电脑作为特例进行说明，其他尺寸较大的无线被测设备可沿用这些基本原则。

第一步：调整手机夹具。

将手机夹具上部滑块夹钳移除，留下手机夹具的底座，并将笔记本电脑夹具扩展件安装到底座上，如图 2-21 所示。使用设置螺栓控制松紧度，调整扩展件的高度，两条白色支柱的长度是笔记本扩展件可被设置的最大高度。

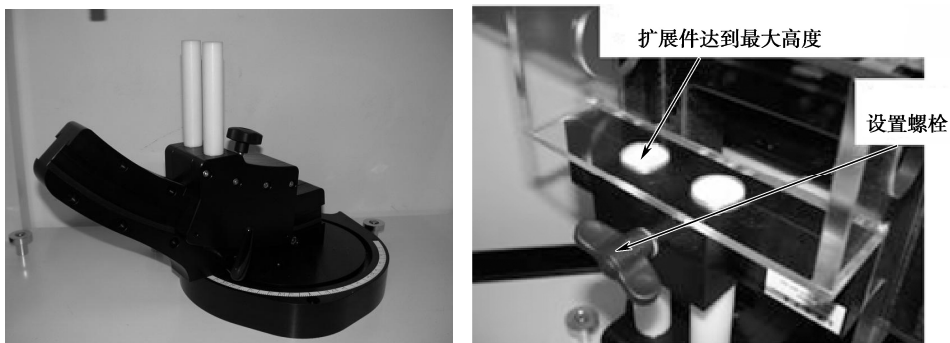


图 2-21

第二步：调整笔记本电脑扩展件。

笔记本电脑扩展件有三种调整方式，如图 2-22 所示。

- ① 使用螺栓 A 实现升降调整。
- ② 使用螺栓 B 调节被测笔记本电脑与假人底面贴靠时的水平度。
- ③ 使用螺栓 C 将被测物垂直锁定。

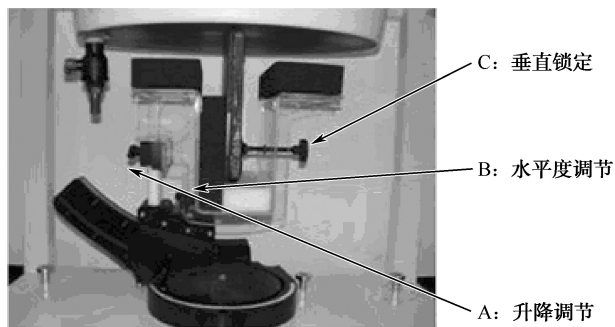


图 2-22

第三步：被测物的水平摆放。

将被测物水平放置在笔记本电脑扩展夹具上，如图 2-23 所示。将待测辐射区域摆放至假人模型中心点，并用升降调节螺栓（螺栓 A）使笔记本扩展夹具上升，直到被测物接触到假人模型的表面。若被测物太薄，可额外用低损耗的泡沫塑料垫起来增加高度。



图 2-23

第四步：被测物的垂直摆放。

将被测物垂直插入笔记本电脑扩展套件内，如图 2-24 所示。将待测辐射区域与假人模型中心点垂直对齐，调节升降螺栓直到被测物接触到假人模型表面。有些被测物高度或长度不足以接触到假人模型表面，建议可另外添加低损耗泡沫塑料来增加高度，如图 2-24 标记所示。轻轻旋紧垂直锁定螺栓（螺栓 C），将被测物在垂直面内锁紧。注意，螺栓 C 不可旋得过紧，以防过度挤压损伤被测物。

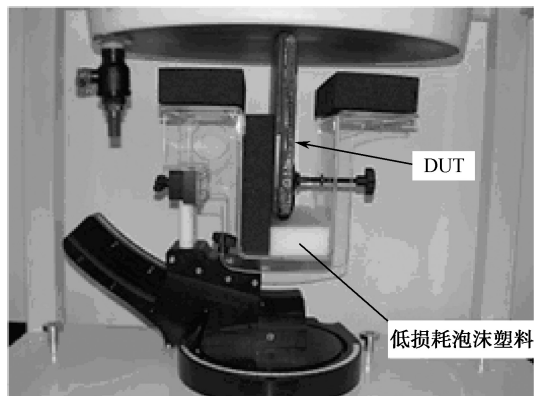


图 2-24

如图 2-25 所示为 2011 年 SPEAG 公司发布的最新版本的笔记本电脑扩展套件，提供了三处垂直螺栓安装位置，方便在垂直面内固定不同大小的被测物，以保证能将尺寸较小的被测物垂直锁定在正确的位置上。



图 2-25

2.2.12 系统验证套件

1. SAR 系统验证偶极子天线组件

SAR 测量系统 DASY5 SAR, PRO 以及 NEO 系列都配有一个或多个 SAR 测量验证组件。这些用于验证系统的组件连同 DASY 软件预先设定的 SAR 测量程序，方便用户进行系统检查和验证。在 SAM 双半头假人模型的平坦段内部产生已知的 SAR 值分布，可实现对测量结果的检查和验证。

系统验证套件包含偶极子天线组件、三脚架、有机玻璃垫片。三脚架用来将偶极子天线固定摆放在假人平坦段下方，有机玻璃垫片用来使偶极子天线以规定距离贴靠到假人表面。偶极子天线组件包含的各种偶极子天线中心频率在 300MHz~6GHz 之间，可用于各种不同频率的验证。

偶极子天线中心频率应当与组织模拟液目标频率一致。当平坦假人（如 ELI 系列假人）或 SAM 双半头假人模型中装入相对应频率的组织模拟液后，偶极子天线在平坦段正下方以垫片厚度贴近假人表面时，可表现出良好的阻抗匹配，且辐射方向对称。将垫片卡在天线中心，可使天线与液面距离准确地达到规定值。

偶极子天线 SMA 端子馈送功率须具有较高的精确度（<3%），以保证 SAR 值分布的准确度。

2. 助听兼容系统验证偶极子天线套件

SAR 测量系统 DASY5 系列包含有助听兼容（HAC）测试套件，其系统验证使用的偶极子天线中心频率包括 700MHz，835MHz，1880MHz，2150MHz，2450MHz。这些偶极子天线是在测量 DUT 之前用于进行测试系统验证。偶极子天线通常放置在将要摆放 DUT 的位置上，全体偶极子天线具有相同的高度，以确保能按同样的姿态位置准确地贴靠在 HAC 测试夹具的中心点。

2.2.13 标准样品

标准样品可作为标准被测手机用于 SAR 测量系统验证。标准样品外形是长方体，如图 2-26 所示，提供非常稳定的双模辐射，为 SAR 测量或 OTA（over-the-air）测量提供准确且稳定的参考信号源。标准样品不仅可用于各种测量场合，它也有别于一般手机，其工作方式不需要连接到无线网络或接收控制信令。标准样品是一个简单且独立的比对装置，不同于标准天线，不需要具有外部源和线缆。标准样品的天线在不同环境加载情况下均可达到良好匹配，因而无论与假人模型间隔远近均可保持较为固定的辐射功率。



图 2-26

2.2.14 电介质测量套件（DAK）

电介质测量套件（DAK）是 SPEAG 公司用于准确测量电介质参数的产品，其测量频率范围覆盖 10MHz 到 50GHz。测量探头基于开路同轴线设计（原理详见第五章），采用了较新的算法和新颖的硬件设备，测量方式简单、快速、无损，可用于液体、固体、凝胶介电参量测量，介电参数量程大。

在介电参数高精度测量的各种应用场合，包括电子、化学、食品和医疗（例如人体组织）行业，DAK 套件都能适用。其硬件的设计可适用于各种不同环境。DAK 探头在设计上可与各种被测固体、液体、凝胶样品良好接触。配备的短路块重复性高，可提供良好的系统校准。DAK 可搭配市面上常见的各式矢量网络分析仪。

DAK 软件使用了可实现快速、高精度测量的先进算法。提供了各种不同介电参数显示格式（线性和对数图、史密斯圆图、Cole-Cole 图以及表格）供使用者选择。其所提供的功能丰富的数据分析套件可让用户对介电数据进行曲线拟合，与目标参数比较，并查看容差和不确定度范围。并可利用内置的 Python 接口进行设备控制 and 数据分析。数据也可按多种不同格式导入，并导出至 DASY5 及 SEMCAD X 使用。

2.2.15 SAR 测量系统的开机和关机

1. 开机

建议按照如下程序：

- ① 运行 DASY5 程序。

② 确认已开启全体紧急制动开关。

③ 将主控制器开关拨到位置“1”。机器手臂控制器完整启动过程需要大约 1min，期间七段数码管指示器会不断闪烁，待 SPEAG 远程控制盒上的故障灯熄灭，表示成功开启了控制器；机器手臂手工控制手柄（MCP）显示屏显示 SPEAG DASY 应用程序。

④ 安装数据采集单元（DAE）和场强探头，开启 DAE 开关。

⑤ 启动机器手臂前须确认无人待在手臂运动区域内。

⑥ 启动机器手臂。如图 2-27 所示，在通常工况下，机器手臂操作方式如下。

※ 按下按钮 1，直至选中手动模式（DASY 系统新版本可打开远程控制盒上的手动模式开关）。

※ 按下按钮 3 打开机器手臂电源。

手臂电源控制灯将闪烁几秒钟并保持常亮，表示机器手臂已准备就绪，并亮起蓝色信号灯。

※ 再次按下按钮 3 或按钮 1 将会关闭机器手臂电源，且刹车系统会自动开启。



图 2-27

2. 关机

当红色与蓝色信号灯亮起时，机器手臂是上电开启状态，表示机器手臂各个关节刹车装置处于释放状态，机器手臂靠电机停留在固定位置。因此，必须注意在机器手臂上电状态下不可关闭主电源，这可能使得机器手臂产生一个不可预料的运动动作，造成场强探头损伤。

建议关机顺序如下：

① 令机器手臂移动到场强探头可易于拆卸的位置（例如机器手臂在假人模型上方的驻定位置），卸下场强探头和 DAE。

② 关闭机器手臂电源。可在控制手柄上按下按钮 3，或在 DASY 软件中点击机器手臂图标按钮。

③ 关闭手臂控制器，将主控制器开关拨到位置“0”。

④ 按 DAE 电源按钮 2s，关闭 DAE 电源（DAE 也具有自动关闭功能。若控制台与 DAE 没有数据联络，例如测量任务结束，DAE 将处于闲置状态，当超过 20min，它会自动关闭）。

⑤ 保存所有测量文件，关闭 DASY5 程序。

2.3 机器手臂

2.3.1 机器手臂硬件简介

SPEAG 公司 SAR 测量系统 DASY5 系列采用了法国 Staubli SA 公司高走位精度工业用机器手臂 TX60L, TX90XL 以及 RX160L。TX 系列机器手臂是著名的 RX 系列机器手臂的扩展型, 满足 SAR 测量取点定位和电磁兼容的需要, 提供 DASY 应用程序功能, 它具有以下优点。

- (1) 高精度 (复现精度 0.02mm)。
- (2) 高可靠性 (工业设计)。
- (3) 低维护成本 (几乎免维护, 采用直驱齿轮, 非皮带传动)。
- (4) 免拉直式运行 (无刷同步电机, 无步进电机)。
- (5) 低 ELF 干扰 (封闭金属外壳屏蔽电机电磁场)。

该系列机器手臂由 Staubli CS8C 机器手臂控制器所控制, 机器手臂的组成是免维护的六轴结构, 每个轴配有无刷同步电机。机器手臂上电后由 1, 2, 3 和 5 轴的刹车装置固定住。上电后刹车装置被释放开, 手臂由电机固定住。注意, 手臂固定从电机锁定转为刹车锁定时, 在手臂最前端可能会出现小幅移动, 因此在场强探头临近障碍物的情况下不能切断手臂供电。

刹车装置也可手动解除。首先, 打开控制器, 选择要解除刹车装置的轴, 转动机器手臂背部的旋转开关。一直按住位于旋转开关旁边的刹车释放按钮, 刹车即被解除。需要注意的是, 当释放轴 2 或轴 3 的刹车装置时, 需要支持住相应手臂, 以防手臂下落毁伤。

机器手臂控制器 Staubli CS8C 是新式工控计算机, 主要部件由 Staubli 公司生产, 保证了备用元件的供货和性能一致。该控制器安装在 19 英寸的机柜里, 机柜尺寸 68×55×60cm (长×宽×高), 所有连接机器手臂控制器 (机柜) 与机器手臂的线缆为 10 米长, 主电源开关位于控制器上, 其他功能可进行远程控制。

机器手臂控制器要求三相电源供电, 可匹配大多数国家标准市电规格, TX90XL 机器手臂与 CS8C 控制器在 208V 交流电时每相电流为 12.0A, 400V 交流电时每相电流为 4.0A。为避免控制器工控机元件过热, 建议每年清洗一次进风口过滤器使得空气流通顺畅。

机器手臂的手动控制手柄 (Manual Control Pendant, MCP) 如图 2-27 所示, 是机器手臂的人工操作界面。在 DASY 系统中, 通常用于特定的机器手臂设置过程, 在执行测量任务期间无须用到 MCP。

在 MCP 面板上有若干组 LED 指示灯, 在开启上电时会全数点亮, 表示系统在运行启动流程和自检。LED 在初始程序中会不断闪烁, 表明功能正常。若 LED 有损坏则须更换。

- 模式按钮 1, 仅在手臂控制器软件 VAL3 版本比 6.4.x 低时有效。模式按钮允许选择两种操作模式——手动模式和自动模式, 其他模式已被 DASY 软件禁用。所选择的操作模式由按钮旁亮起的 LED 灯指示。为安全起见, 当变更模式时手臂是不上电的。
- 手臂电源按钮 2, 用于开启机器手臂。绿色 LED 表示手臂电源已启用。若选择了手动模式, 且 MCP 未被放置在其铁架上, 安全开关 11 必须被按下。否则需将 MCP 从铁架上移开且按下安全开关 11。

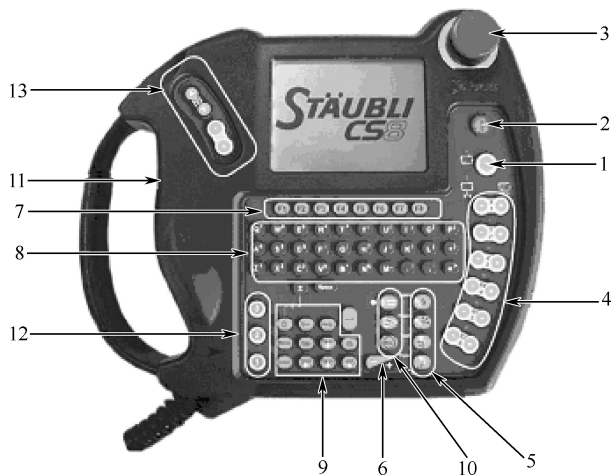


图 2-28

- 安全开关 11 是三段式按压开关，三段功能如下：
 - 不压按：所有连接处于开启状态；
 - 压按至中间位置：所有连接处于关闭状态；
 - 压按至底：所有连接保持开启状态，直到本开关释放。
- 若机器手臂处于手动模式，安全开关 11 需要按下至中间位置以使手臂上电，或者 MCP 需要放置在其铁架上。若机器手臂处于自动模式，安全开关 11 自动处于禁用状态。
- 紧急制动按钮 3，用于停止机器手臂供电。只可在紧急情况下使用它。
- 运动按钮 4，仅在手动模式时是激活的。机器手臂可沿其轴或在其坐标系统中运动，这两种方式取决于所选择的运动模式。
- 运动模式按钮 5，用于选择运动模式，如图 2-29 所示。



图 2-29

- 速度选择按钮 6 如图 2-30 所示，用于选择在人工模式下机器手臂的运动速度。选择的速度的速度将显示在状态窗（屏幕顶端）。
- 为清除不必要的机器手臂信息提示（例如在人工训练机器手臂设定三个坐标参考点或用激光束走位校准），可按下用户按钮，如图 2-31 所示。



图 2-30

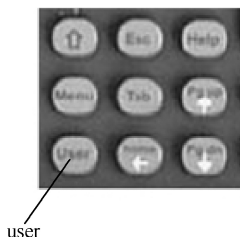


图 2-31

注意，从手工模式重新回到自动模式时，需要重新将机器手臂速度设置为 100%。

对于机器手臂的远程控制，带有工作模式选择的 DASY5 机器手臂远程控制盒必须摆放在易于操作员接触的地方，且远离机器手臂工作区域。远程控制盒如图 2-32 所示，与装有软件 VAL3（不低于 6.4.x 版本）的 CS8C 机器手臂控制器兼容。



图 2-32

远程控制盒有两个主要功能：

- E-Stop 的功能是立即停止机器手臂运动。按下 E-Stop 按钮即可对手臂紧急制动。当按下 E-stop 按钮，手臂不会再有任何运动，并且亮起红色故障警示灯。重新启动手臂控制器，须将 E-Stop 按钮逆时针方向旋转，使 E-Stop 按钮弹起。
- 钥匙开关提供了工作模式选择，可使机器手臂控制器选择自动或手动工作模式。对应的 LED 灯指示了所选的工作模式。正常 DASY 操作，是选择 AUTO 模式。在机器手臂上电情况下改变启用的工作模式将导致控制器对机器手臂断电，中断正在运行的应用程序。

老版本 VAL3 软件装配的 CS8C 所配备的是尺寸更小的远程控制盒，它只具有 E-Stop 功能。机器手臂的远程控制配备了 Y 型电缆，一端连接到 DASY5 测量服务器“紧急制动”连接头，另一端连接到 CS8C 控制器 J116。工作模式选择用的短路插接可用于机器手臂操作故障诊断，如图 2-33 所示。



图 2-33

2.3.2 安全特性

SAR 测量系统使用了机器手臂，大多数国家对机器手臂环境提出了有关人身安全的法规。尽管 DASY5 系列系统提供了种种安全措施，但 SAR 测试操作员有义务使测试环境满足

国家安全法规。

DASY5 系统使用法国 Staubli 公司机器手臂系统，其提供的安全措施有：

- 外部信号灯可指示当机器手臂处于上电状态时，机器手臂是手动状态（由 MCP 控制）还是自动状态。信号灯需要安装在机器手臂工作区的明显位置。
- 测试状态时计算机 DASY 软件能够限制机器手臂的运动速度。
- 在手动模式操作机器手臂时，Staubli 软件根据安全法规限制机器手臂的运动速度，控制手柄上的开关能够保证操作员的安全性。
- 远程控制盒上设有紧急制动按钮。远程控制盒应放置于操作员容易拿到的地方。
- DASY 系统在测试服务器背后预留了接口，用于连接附加的安全设备，如信号灯、电源接地接口、玻璃门开关等。
- 在自动或者手动测试状态下，一旦场强探头受到外来接触，系统即刻停止运行，机器手臂会立即断电。
- 断开 DAE（例如更换场强探头）时，机器手臂会立刻断电。
- 系统带有看门狗，断开任何用于运动控制的通信线缆，机器手臂会立刻断电。

为保证机器手臂安全作业，实验室必须提供下列最低要求条件：

- 系统必须放置于非实验人员不会进入的区域。机器手臂附近的安全区域需要有清晰的标记指示，包含警告标示，地板标示，障碍物，屏蔽室等。
- 如果实验室规章制度要求在计算机控制测试过程时不允许进入机器手臂工作区域，最好按照机器手臂安全指南增加相应的防护装置。
- DASY 系统使用的 TX90L 和 RX160L 系列机器手臂需使用专门的底座固定，该底座需要通过膨胀螺栓固定在地板上，确保可避免手臂倾覆。
- 仅允许受过训练的人员操作系统。
- 当信号灯的灯泡出故障时，需及时更换。
- 只有在机器手臂断电或者操作员按住控制手柄上机器人开关时，操作员才允许进入机器手臂工作区域进行安装或定位。
- 在对机器手臂开展任何作业前，请确保手臂处于断电状态。
- 在对控制器维护前，应拔掉电源线。
- 机器手臂工作区域内不允许放置易燃或有腐蚀的物品。

操作员亦可参考法国 Staubli 公司提供的安全事项手册。

机器手臂系统为实现紧急制动，提供了一条专门的安全链路。该链路由两条穿过所有安全部件的电线组成，一旦安全链路出现中断，电机放大器高压供电将立即切断，各个手臂轴刹车电压会立刻断开。当安全链路断开，位于控制器面板及远程控制盒上的红色报错灯会显示。

安全链路包含以下组件：

- 位于控制器前面板的紧急开关（自锁按钮）。
- 远程控制盒前面的紧急开关（自锁按钮）。
- 控制手柄上的紧急开关（自锁按钮）。
- 控制手臂上的机器人开关。
- 机器手臂背面的旋钮开关。
- 位于测量服务器内部的继电器。若计算机关闭或线缆断开，安全链路则处于开路状态，

DASY 软件将激活该继电器，无论是在正常的系统工作状态，或在紧急制动开关启动后。

● 预留的可选安全线路接口。

当连接服务器与机器手臂控制器线缆断开时，或控制手柄与机器手臂控制器线缆断开时，安全链路也会断开。在没有使用控制手柄或者没有外部安全设备情况下操作机器手臂时，必须接上由 Staubli 及 SPEAG 提供的假接插件。

紧急制动按钮仅在紧急制动时使用。关闭机器手臂供电或停止正在进行的手臂运动，仅在计算机应用软件上进行。

机器手臂具有转轴角度限制。在机器手臂控制手柄 MCP 上可编辑机器手臂每个转轴的转动角度范围。转轴角度范围限制能够防止处在受限狭小空间运行的机器手臂可能出现的碰触。安装 DASY 系统时可按需要设置转动角度参数，让系统达到最好运行状态。尤其是对第 5 转轴的角度限制能够避免 DAE 支架或 EOC 可能发生的碰触。在机器手臂控制手柄 MCP 上，须输入管理密码方可改变转轴转角。

最大工作区域以及预设的轴转角如表 2-1 所示。

表 2-1

MAX ROBOT WORKING RANGES

	TX60L		TX90XL		RX160	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Axis # 1	-180	180	-180	180	-160	160
Axis # 2	-127.5	127.5	-130	147.5	-137.5	137.5
Axis # 3	-142.5	142.5	-145	145	-150	150
Axis # 4	-270	270	-270	270	-270	270
Axis # 5	-122	135	-114	140	-105	120
Axis # 6	-270	270	-270	270	-270	270

SPEAG DASY 5 PRESET

	TX60L		TX90XL		RX160	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Axis # 1	-180	180	-180	180	-160	160
Axis # 2	-120	120	-130	147.5	-137.5	137.5
Axis # 3	-135	135	-145	145	-150	150
Axis # 4	-270	270	-270	270	-270	270
Axis # 5	55	123	-100	135	-105	120
Axis # 6	-270	270	-270	270	-270	270

当在 MCP 上改变转轴限制后，需要将新的参数加载到 DASY 软件里，DASY 软件会根据此参数做手臂运动预测和预置运算，参数导入窗口如图 2-34 所示。

在场强探头碰触监测方面，为防止撞坏探头，DASY5 系统具备可监测探头碰触的组件和软件，产生相应的保护措施。对应于探头安装夹具，DAE 上有相应的两个开关系统。第一个开关系统（探头触碰）可监测正面碰触探头，在机械式表面探测期间，此开关可用于确认假人模型表面的位置。探头连接器可向 DAE 盒子内垂直压进 20mm 距离；第二个开关系统（探

头碰撞) 可用于监测探头侧面碰撞以及正前方位移超过 10mm 的碰撞。

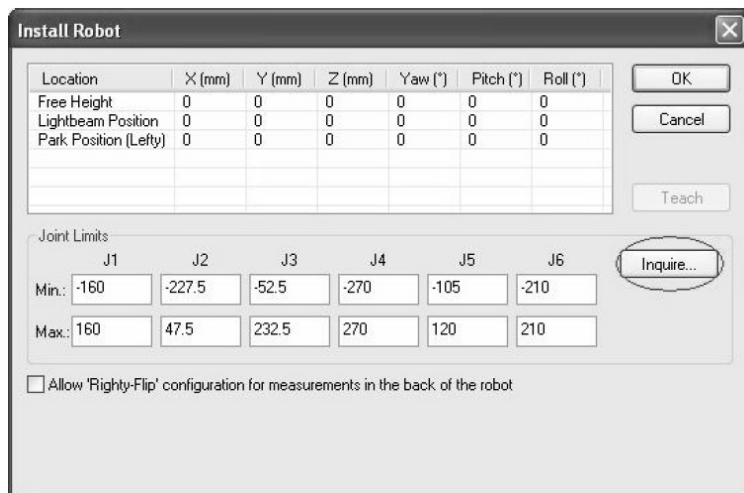


图 2-34

当监测到探头碰触时, 测量控制器软件会停止任何受控于软件的手臂运动, 若在手动模式下, 机器手臂将会断电。机器手臂应当在几毫秒内响应执行取消的指令, 否则测量服务器会采取紧急制动。在机械式表面探测期间, 当出现预期的探头碰触时, 测量程序会继续正常运行。若探测到的碰触是在预料之外的, 测量程序将会终止, 计算机显示出相应的错误信息。

如果是探头触碰开关被激活, 机器手臂会保持上电状态并可被再次启动, 使用软件工具栏中 “move back from collision” 按钮可将探头移开假人模型表面。

如果是探头碰撞开关被激活, 机器手臂不能重新上电。需将 DAE 从其支架上取下, 打开机器手臂电源, 将探头从碰撞位置移开, 重新安装 DAE。此时推荐重新进行激光束校准, 使得重新安装的探头与之前的定位保持一致。

2.3.3 组件及其连接

机器手臂和测量服务器软件是一组软件集, 以 SAR 测量系统 DASY5 系列为例, DASY5 系统软件是相互连接的程序。

(1) DASY5 的计算机程序以 C++ 语言进行源代码编写, 运行在 Windows 2000, Windows XP 或 Windows 7 系统, DASY 程序的优先级由操作系统决定, 可在后台运行。

(2) 测量服务器运行的软件同样是以 C++ 语言编写的源代码, 主要负责实时作业的安全性, 并控制与机器手臂和 DAE 的底层链接, 实时回应和发送指令。

(3) 部分由机器人语言 VAL3 编写的程序在实时多任务机器手臂控制器上实时并发运行, 它们控制机器手臂的运动以及后台安全性操作。

机器手臂控制器及测量服务器软件可通过计算机安装程序下载, 当软件更新时, 机器手臂不需要有任何操作。由于下载较慢, 机器手臂软件会同时刻录在机器手臂控制器硬盘里。控制器上程序自动运行是通过在安装阶段设定 config_c 配置程序。DASY5 软件能够检测到机器手臂和服务器的版本, 并提示用户更新软件合适版本。

机器手臂控制器通过信号线连接到测量服务器上。

① 通过以太网网线相连。可用来下载软件，可用来发送 DASY5 程序指令、接收机器手臂信息、进行其他的底层通信。

② 四根数字 I/O 线将测量服务器与机器手臂控制器相连。这四根线缆用于实时关键操作（假人表面探测，紧急运动制动）编码指令的交换。

机器手臂具有扩展件。机器手臂控制器上的 I/O 线缆都接到测量服务器，服务器作为机器手臂控制器的前端接口。在 DASY5 系统中，下列机器手臂扩展件直接连接到测量服务器。

① 安全信号灯（绿/蓝/红）：绿色灯表示机器手臂处于断电状态；蓝色灯表示机器手臂处于手动控制状态；红色灯表示机器手臂处于计算机控制状态；

② 远程控制盒：提供紧急制动按钮，红灯指示出现报错（例如，紧急制动）；

③ 激光束单元：安装在机器手臂基座上，用于做激光束定位校准；

④ 门禁：是用于可选安全设备的连接器。若门禁接头没有启用，必须插入模拟短接模块。测量服务器需要安装在机柜内，如图 2-35 所示。



图 2-35

机柜安装步骤如下。

① 将机柜箱拆包。

② 将机柜上盖四角螺钉取下，拿开上盖。

③ 将侧盖上部中间的螺丝取下，拿开侧盖。

④ 将机柜摆放在较容易操作的位置。

⑤ 卸下机器手臂控制器主线缆接头盖子，露出主线缆（供电交流线以及机器手臂与机器手臂控制器连接线缆）接口。

⑥ 将主线缆接头固定到连接机器手臂控制器接口上，将机器手臂控制器主线缆穿过机箱底部线缆槽，卡到底部托口。

⑦ 将三根 I/O 线连上机器手臂控制器与测量服务器，连同以太网网线，一同卡到控制器底部的托口。

⑧ 将控制器从机柜门一侧慢慢塞进去，建议使用控制器壳体上的拉钩将控制器提起来，将其固定支撑。塞进机箱后，将控制器放于支撑钢条中部位置，控制器最终由四个橡胶脚垫平坦支撑。

⑨ 连上所有连接机器手臂控制器与测量服务器之间的线缆。整个机柜装置有一个共线接地端（位于左侧或右侧脚），将其连接到实验室的接地端子上。

⑩ 将玻璃门拆包，将其下方拼针装在控制器底部的孔上，再对准上部拼针孔，插入机柜上部孔中，完成玻璃门的安装（玻璃门既可以安装成向左打开，也可安装成向右打开）。

⑪ 安装上底盖。

2.3.4 机器手臂软件及基本指令

使用机器手臂须通过软件用户接口。DASY5 系统所有的常见操作都可从计算机软件用户界面进行指令。与 DASY4 系统不同，不再使用计算机上 DASY 机器手臂终端窗口给手臂发送指令，且 CS8C 手臂控制器不再支持计算机机器手臂控制终端。在 DASY5 系统中，操作员与机器手臂通信命令只能通过控制手柄操作。

机器手臂基本指令集不直接操作机器手臂。MCP 面板上提供机器手臂用户界面，全体机器手臂命令都放入菜单目录，如图 2-36 所示。菜单同时提供编辑机器手臂参数和应用程序参数的功能。注意不宜通过 MCP 更改任何机器手臂设置和程序设置。

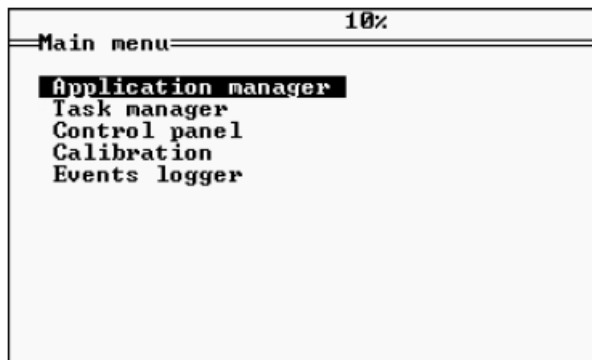


图 2-36

2.3.5 机器手臂的坐标系统

控制操作机器手臂运动有三种坐标模式，分别是手柄上面的“WORLD”、“TOOL”及“JOINT”。按住“MOVE MODE”键可选择机器手臂所在的运动模式。之后若选择计算机自动模式，将屏蔽之前已选择的运动模式。手柄右边的<X/1>至<RZ/6>按钮用于选择坐标或者所要运动的轴。在人工手控制运动前，要确认设置的运动速度，注意在设置了一个新的运动状态后，先用低速运动验证该运动方式。按<+>和<->按钮实现机器手臂做相反方向的运动。机器手臂的运动有三种完全不同的模式。

（1）球坐标。

球坐标是原点位于机器手臂轴 1 和轴 2 交点的绝对坐标。垂直方向是 z 轴，x 轴延展向着机器手臂的正前方向。在球坐标模式下，用<X>，<Y>，<Z>按钮可直接在绝对坐标系中进行运动控制。运动按钮<RX>，<RY>，<RZ>可沿球坐标进行圆周转动。在 DASY 系统启动后，转动中心点即坐标点是探头头部。

探头头部位置球坐标可在 MCP 菜单里显示。上下箭头按钮可浏览 MCP 菜单不同选项，

右箭头用来展开菜单选项。

- ※ 按下菜单键可选中 MCP 的主菜单;
- ※ 主菜单按右箭头可选中控制面板;
- ※ 选中控制器状态, 然后按右箭头;
- ※ 选中直角坐标系位置, 然后按右箭头;
- ※ 探头头部会移到该直角坐标位置;
- ※ 按 ESC 按钮返回主菜单。

x - y - z 坐标以 mm 为单位。定义 Yaw, Pitch, Roll 三个角度是姿态角, Yaw-Pitch-Roll 角以度数为单位。任意一个朝向姿态都可用这三个角度实现: ①Yaw 角是围绕 z 轴的旋转角; ②进行了 Yaw 角旋转后, 围绕新的 y 轴旋转的角为 Pitch 角; ③进行了 Yaw 角和 Pitch 角旋转后, 围绕新的 z 轴旋转的角为 Roll 角。旋转角的正方向按右手定则, 大拇指朝着旋转轴的正方向。垂直方向朝着正下方的探头头部的姿态坐标是 $(0^\circ, 180^\circ, x^\circ)$ 。

(2) 工具坐标。

工具坐标以探头头部为原点, 以探头的方向为坐标轴。探头方向为 z 轴, DAE 支架的正前方向为 x 轴。对于带有朝向传感器的探头, x 轴沿着探头的 x -传感器。采用工具坐标时, 运动和转动取决于探头的实际朝向。 $+z$ 指沿着探头的正向运动。注意区别在球坐标和工具坐标 $+z$ 轴定义, 垂直朝下的探头在球坐标中朝向是 $-z$, 在工具坐标朝向是 $+z$ 。

(3) 单轴角度。

在单轴角度模式下, 每个手臂转轴可单独地运动。在机器手臂上标示了转轴的号码和方向。在操作手柄上, 轴转角按以下操作实现。

使用上下箭头浏览 MCP 菜单选项, 使用右箭头展开菜单选项:

- ※ 按菜单键打开 MCP 主菜单;
- ※ 选择控制面板, 按右箭头;
- ※ 选择控制栏状态, 按右箭头;
- ※ 选择转轴位置, 按右箭头;
- ※ 此时显示了转轴位置;
- ※ 按 ESC 返回主菜单。

机器手臂每个轴转角有最大最小角度限制。角度限制是在软件中设置且可以修改。当操作员或计算机程序试图使机器手臂运动超过限制角度时, 手臂会停止在限制角处, 控制手柄上会显示“某转轴超出了范围”报错信息。可见, 在球坐标模式和工具坐标模式下, 机器手臂的运动方式不同于在单轴角度模式的运动方式。在前面两种模式下, 探头沿着被选中的坐标移动, 其余两个坐标或角度保持不变。单轴角度模式是在设定目标坐标后, 所有的转轴同时动作实现运动。

(4) 假人坐标。

假人模型可建立自身坐标系, 这些坐标仅限于 DASY5 计算机软件使用, 在手动模式下无法使用假人坐标。

2.3.6 机器手臂故障检修

DASY 系列的机器手臂是一个复杂的系统，由于制造商 Staubli 不知晓其机器手臂产品已被集成到 SAR 测量应用场合，故建议手臂出现故障时定位原因，作记录并与 Staubli 联系。用户一方面需要提供用来定位故障的资料，另一方面要生成日志文件。需要的资料有机器手臂序列号（在机器手臂控制器前方面板上），软件和驱动程序相关信息（可通过点击 DASY 软件窗口上面的 help 按钮获取），LED 灯显示状态（手臂控制器前面板，分别是 RPS，ARPS，RSI，CTR）。

机器手臂运行日志可通过 MCP 面板导出。MCP 保存的日志记录了机器手臂运动轨迹信息和出错信息，日志可为故障定位提供分析记录。将日志导出至 U 盘的步骤如下。

（1）单击 MCP 板上的菜单键，主菜单下窗口如图 2-37 所示。

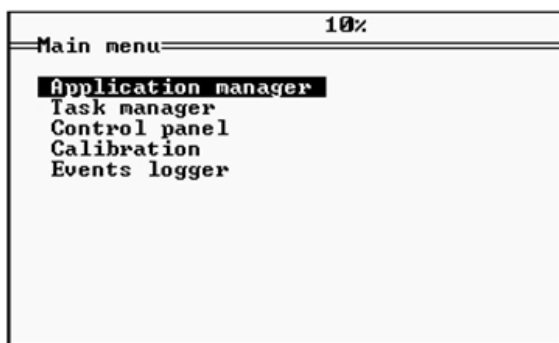


图 2-37

（2）使用上下箭头选择“Events logger”，然后按“return”按钮，如图 2-38 所示。

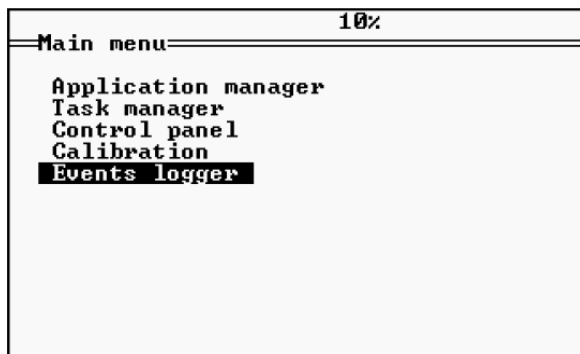


图 2-38

（3）如图 2-39 所示，Events logger 文件将会显示出来，将一个 1~2GB U 盘（格式化为 FAT 格式），插入控制器上面的 USB 口。

（4）单击 F8 键，完成事件日志的导出（Floppy 作为导出操作的地址），如图 2-40 所示。

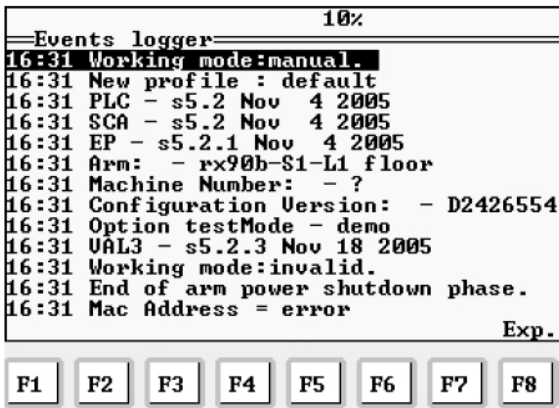


图 2-39

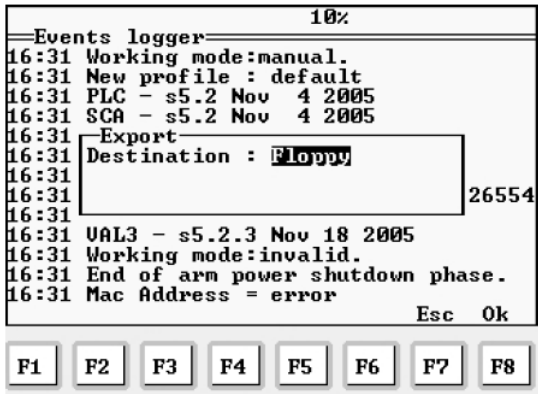


图 2-40

2.4 操作指南

2.4.1 DASY5 软件

DASY5 系统是由各种场强探头（电场，磁场，温度场等）与定位机构（高精度六轴机器手臂）组成的复杂测量系统。该组成可同时通过场强及其位置信息（例如体积均值，峰值搜索，外插值）进行全自动的扫描式测量和评估。其主要目的是辐射区域近场测量，特点是场强非均匀，随方向和位置变化剧烈，因而准确定位非常重要。在比吸收率测量方面，有多项验证要进行，涉及假人模型的存在对场的影响，以及损耗媒质中场强探头的校准。

比吸收率测量系统有多个组件：假人模型、组织模拟液、定位机构、场强探头、数据采集单元、测量服务器、评估程序。每个组件有众多参数，它们都会影响测量结果。

假人模型、信号源、测量位置、探头传感器的相对位置和朝向对于测量和可视化至关重要。对如此众多的参数和设置进行维护与管理，造成操作员重复劳动，也是造成各种人为错误的根源。因此，SPEAG 公司 SAR 测量系统 DASY5 系列旨在为操作员提供一个稳健和可靠的系统环境，该系统是高度自动的，易于使用，对所有的必要设置进行精细的管理。

(1) 每个系统组件有全体必需参数的配置数据集。可导出和导入到软件中, 并可以与 SPEAG 公司提供的组件一起交付。

(2) 所有用户的设置 (例如测量点网格, 可视化) 存储在数据集, 可被导入和导出, 供后续的测量引用。

(3) 测量作业可被定义在若干结构层次上, 从简单的本地场测量到涉及多个场扫描、评估等复杂的批处理流程。

(4) 建立了包含全体参数的测量文件, 随时可对设置进行检查。

(5) 可根据软件操作者的参与级别, 设置被保护的不同访问等级。在最低等级, 普通用户可以启动运行任何先前定义的测量过程, 但无法人为地改变任何关键的设置。

(6) 系统性能检查程序, 可测试整个系统设置的正确性以及硬件组件的完好性。

2.4.2 安装和升级

安装光盘上刻录了 DASY5 应用程序和 SEMCAD X 后处理程序。安装 DASY5 和 SEMCAD X 的计算机最低规格参数和配置是:

- 奔腾 4 处理器, 主频 3GHz。
- 2GB 内存。
- 19 寸或者 21 寸彩色显示器。
- 显卡, 例如 NVIDIA NVS295, 256MB, Quadro, PCIe。
- 两个以太网接口。
- 微软 Windows XP 专业版, Service Pack 3 或 Windows 7。
- IE 浏览器 6.0 以上版本。
- 微软 .NET 3.5。

用户需要有 Windows 系统计算机管理员的权限来安装 DASY5 应用程序。打开或浏览 DASY5 光盘, 双击 DASY52_Installer_x.exe 在计算机上安装 DASY5, 安装前指定文件安装路径。安装完成后, DASY52.8 图标和 SEMCAD X 图标将会出现在桌面上, DASY52.8 程序组将会被创建在开始菜单中。Windows 系统有软件安全方案设置, 当在 DASY5 计算机上安装 Windows 安全软件, 如果安全方案设置得高, 需要将提示异常的操作添加到安全方案中, 以允许 DASY5 应用在主机上运行。如果安全方案设置为阻止应用程序运行, DASY5 将无法启动。如果 DASY 启动时没有安全异常提示, 请检查 DASY.exe 进程是否出现在 Windows 任务管理器列表。如果没有该进程, 则是安全方案阻止了应用程序。

操作员需要了解 DASY 软件许可证和设置。DASY5 提供了不同的系统等级, 分别是 SAR, AIR, PRO 或 NEO。软件使用需要得到许可, SPEAG 提供的是文本文档形式的许可证, 命名为 license.dat, 复制到指定文件夹位置。由于文件夹结构不同, 依赖于 Windows 系统类型 (即 Windows XP 或 Windows7) 以及语言设置, 从开始菜单运行 RUN.exe, 并粘贴 %ALLUSERSPROFILE%\Documents\DASY52\Configuration, 可定位正确的许可证文件路径。

DASY5 应用程序运行时会读取许可证资料, 并在主窗口标题栏显示许可的系统等级, 根据许可等级标题栏会显示 “DASY5 SAR” 或 “DASY5 AIR” 或 “DASY5 PRO” 或 “DASY5 NEO” 等标题。当标题栏只显示 “DASY5”, 表示未找到有效的许可证, 这时大多数功能无

法使用。DASY5 需要用 SEMCAD X 处理测量结果, 做可视化渲染 (例如求解, 插值和外推, SAR 值平均)。SEMCAD X 提供了先进的处理功能, 必须有许可证才能运行, 许可证由 SPEAG 公司提供 (免费)。SAR 实验人员可能希望使用 SEMCAD X 执行三维时域有限差分 (FDTD) 模拟, 例如与 SAR 测量结果直接比对, 或者解决更一般的辐射源天线设计/优化以及用仿真评估比吸收率。这时, 可联系 SPEAG 公司购买 SEMCAD X 完整版本。

当收到 SEMCAD X 许可证文件 (通常命名 license.dat), 请保存在 DASY5 安装文件夹。如果 SEMCAD X 无法找到许可证文件, SEMCAD X 第一次运行时将弹出一个标题为 Flexlm License Finder 的对话框。选择指定许可证文件, 输入许可证文件位置。注意, 不要故意将 MS-Windows 系统时钟时间回设。Flexlm 许可证程序如检测到系统时间修改, 并认为是试图突破许可保护, 将会导致重新安装应用软件。

若要从计算机硬盘卸载 DASY5 应用程序, 打开 Windows 控制台, 添加/删除程序一项, 在已安装程序列表中选择 DASY5 软件, 点击添加/移除按钮, 将可启动卸载程序。

为更好地管理安装了 DASY 软件的计算机, 操作员需要了解提供许可的一些技术细节。

(1) 用 USB 加密狗绑定计算机。

对于 DASY5 V52.x, 许可证已被绑定在 SPEAG 公司提供的 USB 加密狗 flexid 上。将 USB 加密狗插入计算机 USB 接口, 安装 USB 加密狗驱动程序。在开始菜单选择 DASY5 V52 文件夹, 从子文件夹 License Manager for Flexlm 运行 FLEXidInstaller.exe, 按指示操作, SPEAG 公司将发布 USB 加密狗已含软件功能的许可证文件。

(2) 子网计算机浮动绑定。

① 许可证服务器配置。

服务器的许可证文件已被绑定在 SPEAG 提供的 USB 加密狗 flexid 上。当用户通过电子邮件向 SPEAG 公司确认收到许可证文件且安装好 USB 加密狗, SPEAG 公司会颁发软件功能组件的许可证文件。

许可证服务器需要由管理员用 Flexlm 功能组件 lmttools.exe 和 lmgrd.exe 配置, 两个程序可在 DASY5.2 安装文件夹的 Flexlm 子文件夹中找到。请确保防火墙不会阻止许可证服务器的通信。

运行 lmttools.exe, 管理员首先在 Service/License File 界面选择 Configuration, 然后到达 Config Services 界面。首先, 输入 Service Name, 接着是 lmgrd.exe 的路径、许可证文件 license.dat 的路径、调试日志的路径。勾选方框 Use Services, 然后勾选方框 Start Server at Power Up, 点击 Save Service 按钮。最后, 重新启动计算机, 或在启动/停止/重读界面窗口启动服务, 许可证服务器即可运行。

管理员可通过 lmttools.exe 进程 Server Status 和 Server Diagnostics 界面监控许可证服务器的状态。

② 客户端配置。

在 SEMCAD X 第一次运行时会弹出名为 Flexlm License Finder 的对话框, 可在 Select Specify the License Server 输入许可证服务器的名称。若 DNS 查找失败, 将无法选中许可证服务器。推荐方式是在 Select Specify the License Server 选择 SPEAG 公司为许可证服务器提供的许可证文件 license.dat 或 license.lic。

③ 试用版许可证。

许可证文件允许在任何地方运行数目不限的 SEMCAD X 进程，或一个 DASY5 进程。当 SEMCAD X 首次运行时会弹出名为 Flexlm License Finder 的对话框，选择 Select the License File，并选择 SPEAG 公司提供的许可证文件。

2.4.3 访问级别

如果同时多位操作员使用同一计算机 DASY 软件，建议由一个系统管理员来定义所有的测量程序和假人模型设置。操作员可能对 SAR 测量系统 DASY 不完全熟悉，这样可防止由于操作员设置的参数不当，导致获得的测量数据不正确。

DASY5 软件允许不同访问级别有不同的配置。用户（User）模式是最低的访问级别，只允许修改需要每日调整的项目（如组织模拟液参数，或选择用于特定测量设置的 DASY 组件）。管理员（Administrator）模式可定义新的项目（如新的假人模型），允许更新当前的项目（如重新设定探头的转换因子）。从用户模式切换到管理员模式，需要输入密码。校准（Calibration）模式可修改探头和数据采集器单元 DAE 的参数。制造商（Manufacturer）模式是被 SPEAG 公司预留的权限。在表 2-2 中，列出了 DASY5 组件的访问级别。

表 2-2

组 件	安 装 人	完全（部分）访问级别
测量服务器	SPEAG	Manufacturer
数据采集单元	User/Administrator	Manufacturer（Calibration）
场强探头	User/Administrator	Manufacturer（Administrator）
机器手臂	SPEAG	Manufacturer
假人模型	User/Administrator	Administrator
组织模拟液	User/Administrator	User/Administrator
被测设备	User/Administrator	User/Administrator
通信系统	User/Administrator	User/Administrator
测量标准	Licensed	Administrator

2.4.4 被测设备和信号类型

无线通信系统和射频发射机有各式各样的特点，但它们都有一个共同点：按照预先定义的通信协议发送无线信号。

DASY5 系统的场强探头基于二极管检波器，为了探测微波信号，需将射频功率转换为直流信号，即检测输入信号源的幅度。此外，在 DASY5 系统对输入信号的滤波取决于输入信号的调制频率。为了 DASY5 系统能够准确测量，输入信号的信道频率、波形有效值、调制频率的设置是至关重要的。

此外，被测设备几何信息可在 DASY5 设置中定义。几何信息用于扫描区域的优化以及结果可视化，对测量结果没有直接影响。

数据采集器单元提供 16 位数字测量结果。数据率取决于通信系统调制频率和测量时间

设置 (最大读取速率是每秒 10,000 次)。数据采集单元可在所需输入通道和放大器之间切换。三通道测量速率是每通道每秒 2604 次完整测量。在 DASY5 方案中, 输入数据经预滤波, 以较慢的速率传输至计算机应用程序, 再次滤波后进行数据整合。DASY5 应用程序定期地请求 DAE 在零点输入时测量结果, 以补偿放大器的失调和漂移。滤波特征、测量时间、DAE 的放大, 以及自归零周期测量可在测量设置中选择。

第一步是用 DAE 单元的校准参数对 DAE 输入端电压量化, 分辨力可达到微伏。DASY5 系统其他输出量都取决于 DAE 输入电压。带有检波二极管传感器的探头是非线性的。在二极管压缩点以下, 输出电压正比于施加到二极管的射频电压幅度的平方。在二极管压缩点以上, 输出电压与射频电压呈线性。每个 DASY 场强探头的转换特性需要被特定给出, 测量系统自动地复原测量场强大小。应注意, 由于探头高阻抗, 放大器的输入电压取决于输入阻抗和放大器偏置电流。探头在不同类型放大器上使用, 灵敏度和偏移会有所不同。

根据探头类型, 电场和磁场值从输入信号和探头校准参数中评估得出。其中包括二极管特性的线性化, 如有必要, 还将进行探头频率响应的校正。在探头校准过程, 分别对 *xyz* 三个传感器完成标定, 得到场强三个分量。对于场强量, 总场值是三分量平方和的方根; 对于功率量, 总场值是三分量值之和。

比吸收率值 (SAR 值) 或等效功率密度值可从场值计算得出。电场探头在有耗介质中测量, 对应得出 SAR 值; 在无耗介质对应得出功率密度。

在 DASY 软件中, 万用表作业可直接访问场强测量单位。无须机器手臂供电即可使用。在波形窗口, 数据既可显示为数值, 也可显示为时间波形。

场强探头的高输入阻抗以及放大器滤波特性使得探头输出呈现低通特性, 过渡频率约为 20Hz。当输入快速调制射频信号, 探头输出并不会跟随, 给出的是均方根读数。对于电平处在检波二极管平方律区域的信号, 无论其调制方式, 将如期得到均方根值。在超出平方律电平范围的信号较大电平部分, 将会得出失真数据。用简单的算法即可在连续波 (CW) 和脉冲信号 (如 TDMA 系统) 情形下补偿, 而对于现代数字通信系统 (如 WPAN, WLAN, UMTS, CDMA2000, TS-SCDMA 等) 需要标定, 以满足合理的测量不确定度。DASY5 V52 版本提供了标定补偿。

在探头调制参数标定方面, 按照 SAR 测量标准 (例如 IEEE—1528b 和 IEC62209—1/2) 的要求, 在 DASY5 V52 版本中可使用更先进的探头响应线性化功能。在给定调制方式下对探头标定可提高精度, 但需要额外的校准评估过程。

对于调制信号, 峰值均值比 (PAR) 表示最大峰值功率与调制信号平均功率的比值。PAR 通过补充累积分布函数 (CCDF) 度量, 给出了功率水平的统计描述。

对于脉冲调制信号 (TDMA), 波峰因子 (*cf*) 和峰值均值比 (PAR, 单位: dB) 之间的关系可以指定为

$$PAR = 10 \lg(cf)$$

帧的长度 (单位: ms) 是调制信号需被测量的最短时间。对于脉冲调制信号 (TDMA), 它是调制频率 (单位: Hz) 的倒数, 可给出如下

$$frame\ length = \frac{1000}{mod.\ freq.}$$

探头调制因子 (PMF) (定义可参见 ANSI C63.19, 段落 4.2.2.1 和 C.3.1) 已被集成到

DASY5 V52 版本。PMF 将探头读数 (场强功率均值) 转换为包络场强峰值。峰值幅度定义为经过 20kHz 带宽 (人耳最大可听到音频带宽) 限制后的包络峰值。DASY 软件对于为特定通信系统 (可参见 ANSI C63.19-2007 定义) 标定的探头提供了 PMF 参数。对于仅仅在连续波环境下标定的探头, 后处理软件提供了默认的 PMF 参数值, 该参数值根据波峰因子 (cf) 近似得出

$$PMF = \sqrt{cf}$$

上述近似对于用电场探头测量脉冲包络波形 (例如 GSM) 是足够准确的。对于用磁场探头测量非脉冲包络的通信系统, 就需要进行校准。在场强测量中, 操作员就需要用适用的 PMF 值替代其默认值。

调制干扰因子 (MIF) (定义可参见 ANSI C63.19, 段落 4.3, 以及 D.7) 也已被纳入 DASY5.2 版本。与探头调制因子 (PMF) 类似, MIF 将探头读数 (场强功率均值) 转换为射频音频干扰加权的包络场峰值。峰值幅度定义为按照人耳最大可听到音频带宽 (20kHz) 频响加权限制后的包络峰值。MIF 仅针对 ANSI C63.19—2011 涉及的通信系统标定的探头提供服务, 对于只在连续波环境中标定的探头不适用。

2.4.5 组织模拟液

在 DASY5 软件, 测量环境在媒质 (Medium) 选项中定义。SAR 测试媒质即假人盛装的组织模拟液, SAR 测试涉及的测量环境几乎都是非磁性的, 这种电介质媒质类型由下列典型参数描述:

- 频率
- 相对介电常数
- 电导率
- 密度
- 热容量

媒质类型参数设置是关于电介质的, 对于磁场测量, 除了频率参数外, 介质参数设置没有影响; 对于非空气环境中的电场测量, 介质参数的设置对测量结果影响显著。在 SAR 测试中, 电场场强测量都是在有耗媒质中进行, 如按直接读取的场强数据进行 SAR 值评估需仔细核对实际组织模拟液介电参数。

比吸收率在很大程度上取决于介质参数。在 DASY5 软件, 需要事先设置每一种介质的参数。用组织模拟液的电导率和从该液体中读取的电场强度计算出以 mW/cm^3 为单位的比吸收率数值。进一步, 再用组织模拟液的密度得出以 mW/g 为单位的比吸收率数值。由于密度不影响假人模型内部的场分布, 因此实际使用的组织模拟液的密度并不一定等于实际人体组织的密度。组织模拟液的密度值通常设置为 1, 代表了人脑组织的实际密度值并非所用到的有耗组织模拟液密度值。在 SAR 值计算中并未使用到相对介电常数的数值。当使用温度探头进行 SAR 值测量时, 需要指定热容量数值, 单位是 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

由于组织模拟液中水份会蒸发且随温度变化会导致介电参数漂移, 因此制备与理想目标介电参数一致的组织模拟液是非常困难的。实际中, 当介电参数与目标值足够接近, 则没有必要进一步调整组织模拟液配方成分。另一方面, 由于测量不确定度存在, 实际介电参数与

液体测量装置给出的读数有一些差别。通过考查 SAR 值对介电参数的敏感性,可按照 SAR 值不确定度规格要求来判断组织模拟液介电参数的读数是否可被接受。

液体介电参数对 SAR 值分布有以下方面的影响。

(1) DASY 软件中的液体电导率用于计算领域的 SAR 值。SAR 值与电导率设置有线性变化。

(2) 液体的相对介电常数和电导率影响实际耦合到的能源模型。这种影响取决于许多因素(如假体形状、距离源、在液体测量位置的距离)。相对介电常数以及电导率在液体中的功率衰减,效果是与液体表面值不同的,影响 1g 或 10g SAR 平均值。DASY 系统不能弥补这些影响,但要在实际使用中测量组织液的 SAR 分布(可能不正确)。

(3) 液体负载效应在模型附近使用。如果液体不同,馈电点阻抗和电流分布源可以改变。

(4) 测试灵敏度取决于周围介质。如果探头用于其他参数而不是测试液体,测得的电场值将是不正确的。

组织模拟液是水与其他组件的混合,其相对介电常数和电导率与头部和身体组织的目标参数,以及模拟液体样品食谱给出的标准(如 IEEE1528—2003, IEC62209—1, IEC62209—2, OET65 等)近似。组织模拟液至少有 40% 的水浓度应保持在环境温度为 22℃,实现测试所需的相对介电常数(约 80)。除了水,更多的组件在不增加上述所需的参考值,对组织模拟液的电导率,相对介电常数进行限制。所选组件决定其频率范围的限制参数。具体组件如下。

① Sugar: for frequencies < 1GHz (糖: <1 千兆赫的频率)。

② DGBE (Diethylene-Glycol-Monobutyl-Ether): for frequencies from 1.0 to 2.5GHz (DGBE (二甘醇单丁醚) 为 1.0 至 2.5 千兆赫的频率)。

③ POEM (Polyoxyethylenesorbitan monolaurate): for frequencies < 5GHz (POEM (聚氧乙烯失水山梨醇单月桂酸) <5 千兆赫的频率)。

④ Oil with emulgators: for frequencies > 2.5GHz (油乳化剂: >2.5 千兆赫的频率)。

此外,微量的添加剂以及作用如下。

① NaCl: to increase the conductivity to the target value (盐: 增加导电性的目标值)。

② Cellulose: to keep the sugar solved (纤维素: 保持糖的溶解)。

③ 防腐剂: 抑制组织模拟液里细菌和真菌的生长。

请注意,参数也会随温度变化。相对介电常数的温度梯度和电导率取决于液体的类型和频率,需在相同的温度下测量液体参数。组织模拟液由于含水量高,在冰点以下储存是不允许的。如果测量条件需要,像头发,灰尘等固体物质的污染物可能会被过滤。在使用测量样品前,确保液体混合均匀,它代表了必要的平均特征。组织模拟液是为了模拟人体内部电解质特性而专门配置。由于模拟频率不同,其相对介电常数和电导率也有所不同,且依据测试要求,模拟液的配方也不同。

2.4.6 场强分布测量

1. 单点测量

需要先在 DASY5 定义软件测量文件,指定场强值或 SAR 值的读取方式,包括设置测量时间,归零时间和归零周期。对于在“通信系统”选项若选择了脉冲信号,可以设置调制频率

率。自动 SAR 测量的典型推荐设置是:

※ 量程: 自动。

※ 测量时间: 0.5s。

※ 归零时间: 0.5s。

※ 归零周期: 10s。

在特殊情况下不同的设置会显著影响测量结果, 以下情况推荐进行其他一些设定。

※ 通过增加测量时间提高小电平信号测量准确度。测量时间最大可设置为 5s。测量小电平信号时, 接地的好坏尤其重要。

※ 噪声在自动归零期间要比在测量期间小。归零时间在 2s 以上不再带来任何改善。

※ 一般在要求非常准确的单点测量中, 建议测量时间可设置在 3s 左右。例如为自动扫描提供功率参考和功率漂移测量, 测量时间设为 3s 可使功率漂移测量达到 0.01dB 分辨率。

※ 在 DAE 单元持续工作 1min 后, 漂移值非常低, 因此可以设每 10s 自动归零一次; 对于正常电平范围, 可以设每进行 100 次测量进行一次自动归零。

※ 推荐对低重复率的脉冲信号进行长时间测量。若将测量时间设置为自动, 系统会在两个脉冲之间的时段中改变测量时间, 降低测试速度。

2. 平面区域扫描

测量区域是指给定的一块矩形平面, 由一系列单点测试组成, 成为一类在 DASY5 软件中设定的作业任务。在比吸收率测量中命名是“平面区域扫描 (Area Scan)”, 在自由空间场强测量中, 命名是“通用扫描 (Generic Scan)”

在 SAR 合规测试中, 平面区域扫描 (Area Scan) 是被测设备 (DUT) 合规测试子项。测试目的是确定 SAR 峰值大致位置。在平面扫描中, 可设置测量网格区域尺寸、步长、偏移。设置值的选取取决于被测设备 (DUT) 的尺寸、位置, 以及测试时间规划。

如果被测设备的 SAR 值分布是未知的, 测试网格区域需要事先能够覆盖整个 DUT 面积, 可将 DUT 几何尺寸显示在 DASY 3D 视图中。对于事先已知或可预测的 SAR 值分布, 测试网格区域可仅覆盖 DUT 出现 SAR 值峰值的那一部分。

最新 SAR 合规测试标准对测量点间距 (步长) 局部最大 SAR 值的定位精度提出要求, 在插值后要优于空间平均单元 (如 10g 人体组织单元) 线尺度的一半。平面区域扫描推荐网格尺寸是 10mm~15mm。

平面区域扫描需要设置测试网格点至假人表面的距离。对于 ET3D 型号探头, 推荐设为 4mm, ES 型号探头为 3mm, EX 型号探头为 2.5mm。如果测试 SAR 的最大值不在网格范围之内或者在边界处, 这个测试区域需要再扩大。

对于无须使用假人模型的自由空间 SAR 值测试, DASY 软件使用通用扫描 (Gereric Scan) 作业任务, 在三维网格每个点测量。网格范围取决于被测量的 DUT 尺寸大小。将其中一个坐标轴设置为零, 即可用于平面区域扫描。自由空间测量数据一般直接当做最终测试结果, 因此网格步长要比平面扫描网格步长小, 建议网格步长是 4mm~8mm。

测试网格点与 DUT 间距主要取决于两个主要因素。一是网格点需要足够靠近 DUT, 保证场强探头能够得到足够多有代表性的数据点; 二是当距离过近时, 需要避免 DUT 和场强

探头之间耦合改变被测电磁场。

在空气中测试时, 探头的散射场不会由于介质损耗而衰减, 能在远离探头测试范围的空间存在。因此, 在空气中紧邻介质或者金属体测量时, 需要细致评估探头边界效应。在空气中使用的电场探头需要评估入射场以不同方向相对探头时边界效应的大小, 需要得到探头头部与金属面直接接触以及探头离开金属面时的场强读数。对于 ER3DVx 型号探头, 探头头部距离金属表面 5mm 时边界效应引起的测量误差在 5% 左右。当距离增大至 6mm 时, 边界效应对场强测量结果造成的影响已微不足道 (误差 0.1dB)。根据上述评估结果, 在通用扫描作业任务中, 通常建议测试网格距离 DUT 表面 5mm~6mm。

3. 立体区域扫描

立体区域扫描是为了确定在三维空间区域的电磁场分布。自由空间中进行的立体区域扫描一般是为了获得足够多的 DUT 辐射场数据。例如, 为了考查角锥天线辐射场的空间对称性。

在比吸收率测量中, 有必要考查空间平均 SAR 值分布中峰值的位置。为此, 需要针对平面区域扫描得出的 SAR 值峰值附近开展体积区域扫描, 并将分辨力设置得更高一些。在 DASY5 软件中, 这样的体积区域扫描作业任务称为精细扫描 (Zoom Scan)。该项作业网格默认为 7×7×7, 默认步长是 5mm。实际中为了减少测量时间, 可减少测试点数目。例如, 将 x 轴方向和 y 轴方向增大步长, 设置测量分辨率为 7.5mm, 将测量点数目设置为 5×5×7。相比精细扫描默认的网格方案, 测量时间减少了一半, 但两者测量结果的偏差仅有 1%~2% 左右。

2.4.7 比吸收率分布峰值评估

空间 SAR 值分布峰值评估的过程依据的是 IEEE 1528.1 标准。可统计出 SAR 值按 1g 平均和 10g 平均的结果, 也可按照用户给出的体积单元大小评估 SAR 均值分布之峰值。

DASY5 系统允许按照测量数据和机器人手臂位置进行评估, 主要有 4 点。

- ① 寻找峰值点。
- ② 外推。
- ③ 边界修正。
- ④ 求 SAR 均值分布之峰值。

对于寻找峰值点, 在执行完至少包含有 6 个测量点的平面扫描后, 软件会自动寻找全局或局部最大值, 基于二次 Shepard 方法计算局部 SAR 值分布的梯度。该算法可找到 SAR 值分布的全局最大值以及局部峰值。

外推过程是为了求得最低测量点和假人模型内部表面间的 SAR 值。外推距离取决于表面探测距离和探头传感器偏移。为了进行外推, 需要在几组不同距离进行测量。

外推要求三维空间至少有 10 个测量点, 这些点用在空间扫描工序, 用于获得假人模型内部与假人模型区域扫描工序平面之间的 SAR 值分布, 用修正的二次 Shepard 方法外推。对于 7×7×7 网格, 步长为 5mm, 空间扫描工序总共有 343 个测试点, 该外推算法对于 1g 和 10g 平均 SAR 值误差小于 1%。

在非常贴近假人模型内表面的 SAR 测量, 需要考虑边界效应的影响。假人模型表面和探头之间的场耦合会影响探头的特性。不同探头边界效应造成的误差可用测量结果分析, 也可

用数值模型分析该影响。与直观判断结果相同,当探头非常靠近假人内壁时会造成灵敏度(转换因子)明显增大。边界效应依赖于探头尺寸且随着探头远离边界而快速衰减直至消失。灵敏度可近似描述为如下公式

$$S \approx S_0 + S_b e^{-\frac{z}{a}} \cos\left(\pi \frac{z}{\lambda}\right)$$

由于探头是细长的,上式中的衰减因子在边界效应中影响更显著,余弦因子可被略去。因子 S_b 和 a 可在探头标定过程中得出(在 DASY5 软件中, S_b 和 a 分别以参数 Alpha 和 Delta 表示),用来补偿边界效应对场强读取值的影响。数值模拟和实际测量已证实上述补偿对于不同的场分布以及边界情况是有效的。

上述简单的补偿可在很大程度上降低临近边界面时探头的测量不确定度,在下列情况也是有效的。

- 边界面曲率半径很小。
- 探头轴与边界面法向夹角小于 30° 。
- 探头到边界面距离比探头直径大 25%。
- 探头是对称的 (xyz 传感器与探头头部等距)。

以上要求都可在 DASY5 系统满足。当探头靠近假人表面时,测量结果可在后处理过程中从原始测量数据中导出。

2.4.8 假人模型

基于机器手臂的 SAR 测试是在假人模型内部进行测量。DASY5 软件中的假人模型不完全对应于实际假人模型,是用来选择一个空间区域,用坐标来定义测量点,控制机器手臂运动。机器手臂位置坐标是以探头头部给出的。

在 DASY 系统,定义了不同型号的假人模型,可在测试任务中引用。在不同测试任务之间更容易快速切换。假人模型主要有两类,使用不同的坐标系定义空间点位置。

(1) 对于自由空间假人模型,所有测量位置按照假人模型坐标系得出。这是最简单也是最容易设置的测量方式,用于在自由空间区域(没有假人)的测量。

(2) 基于 CAD 工具设计的假人模型,有其自身的坐标系,该坐标系是用模型上三个固定参考点定义的。所有其他模型点以此为参考给出。在测试前,需要设置在机器手臂坐标系中假人模型点的定位方式。在软件假人模型加载步骤中,通过定义假人模型三个参考点来完成。假人模型位置存储在软件中,若假人模型重新搬动,就需要重新将其定位。如果上次测试使用过的假人模型没有移动,可用模型确认程序去验证它的位置。实际假人模型常带有三个参考点,这是最常用的方式,一旦导入了其模型的 CAD 设计,该假人模型安放在实验室不同位置时仅需重新定义三个参考点即可。假人模型数据可被导出,供不同实验室使用。

对于每一个假人模型,机器手臂都可以分别通过光学或机械方式进行假人表面探测。透明假人模型只能使用机械式表面探测。

假人模型的 SAR 测量区域称为节,每个假人模型在 DASY5 软件中都包含一个或者多个节,以允许在同一个假人模型定义不同的测量区域。每个节包含下列点或点集。

(1) 每个节需要设置网格参考点(在假人壳体内部)和被测设备(DUT)参考点(在假

人壳体外部)。两者在垂直方向的差值表示为参考位置的壳体厚度。例如, 在 SAM 假人耳朵区域是 6mm, 在平坦区域是 2mm。

(2) 在软件中定义最大测量区域。如果测量网格超出最大测量区域, 这些点将会被标记为不可被测量。

2.4.9 定位精度

测量可在一个固定平面或沿着一个任意的表面进行。对于合规测试, 最关心的是评估最大 SAR 值。测量值只能在模型内部表面读取, 由于探头内场强传感器的偏移, 无法直接测量外壳表面上的场强值。为了外推外壳表面上的场强值, 需要准确知道测量点距外壳表面的距离。在 1800MHz 频率, 距离误差 0.5mm 会造成 SAR 值误差 6%, 将预先设定的位置用于测量不是十分准确。假人模型的任何移动 (例如填充组织模拟液后的微小变形) 都会产生较高的测量不确定度。在 DASY5 系统, 进行假人模型表面自动探测有两种方式。

1. 机械式表面探测

机械式表面探测是用数据采集单元 (DAE) 里的探头碰触探测器。在探头沿法线接触假人外壳表面时, 准确度可达到 $\pm 0.05\text{mm}$ 。探头与表面有一定角度时, 由于是在探头头部边缘实现探测功能, 给出的距离会增大。该方式可适用于各种探头、各种组织模拟液体。如果表面相对于探头有显著的夹角, 探头可能沿表面滑动偏向一边, 这种情况可被 DAE 的第二种机械功能检测到, 探头将被后撤抬起, 直到碰触解除。这可能会对探头最终位置产生一些不确定度。

在实际作业中, 探头到假人模型表面的最小间距可事先输入设定。探头总是先触碰到假人表面, 之后后撤到指定距离, 再开始进行测量。若同时开启了光学式表面探测, 当光学探测无效时, 将按机械式探测进行, 使探头移动到正确的位置上。

2. 光学式表面探测

光学式表面探测需要使用带有接近传感器的场强探头。光学式表面探测的优势是测量探头头部中心到表面的距离, 即使是靠近倾斜表面也可以读出正确距离, 在探头与表面法向夹角 30° 时, 测距绝对误差在 $\pm 0.2\text{mm}$, 在透明液体中重复性是 $\pm 0.05\text{mm}$ 。用软件内置的表面检查作业可容易地找出表面探测故障事宜。液体中的反射会影响探测, 例如小气泡, 或者长期使用后的蔗糖水溶液在假人模型表面附着的非均匀析出物, 将组织模拟液充分搅拌, 通常可解决该问题。

假人模型内表面最小探头靠近距离取决于探头以及液体的光学特性。可在表面检查作业中测量。距离探测不确定度随着探头与表面法向夹角增大而增加, 典型不确定度对应 30° 夹角。

在 DASY5 软件中, 参考点位置是以探头头部位置作为参考。在启动或更换探头后, 软件会读取探头的机械规格, 计算得出探头头部位置, 并计算其相对于机器手臂第六个轴的位置。考虑到机械公差, 实际探头头部与计算得到的位置可能有偏差, 探头头部的典型偏差可达到 3mm。

用激光束对探头头部进行对准, 可完全补偿机械偏移。在设定假人模型三个参考点坐标

以及探头在假人模型内部运动之前进行激光束对准是必要的步骤。在此过程期间，系统测量实际探头长度和偏移量。随后机器手臂的运动已调整到依据实际探头头部位置，可重复性 $<0.1\text{mm}$ 。

2.4.10 预定义流程

将测量流程进行良好的定义，是 SAR 测量结果正确性的保障，并保障 SAR 测量值在给定的误差范围内具有重复性的内在要求。对于评估合规测试，相关 SAR 测量标准（EN 50361，IEEE 1528，IEC 62209）有详细的叙述。DASY5 系统硬件和软件都完全符合这些预定测量过程标准。

根据 IEEE1528 和 IEC62209，评估空间 SAR 均值的最大值推荐流程包含以下步骤。

- 功率参考测量。
- 平面区域扫描。
- 局部立体区域扫描。
- 功率偏移测量。

根据 ANSI-HAC 标准，评估被测设备上方向分布推荐的过程包含以下步骤。

- 功率参考测量。
- HAC 扫描。
- 功率偏移测量。

对于被测设备 SAR 合规测试，安装光盘内有预定义测试工作模板文件，包含了全部测试工序，操作员可根据不同标准，按实际选择的探头、DAE、组织模拟液等设定参数，并设定测试任务。

2.4.11 记录生成和可视化

DASY5 文档文件记录机器手臂的测试结果。文件包含测量设置、全体参数、原始测试数据。用 SEMCAD X 做 SAR 值进一步后处理。优点有：

- 可视化、参数导出和设定与 SAR 测量完全分离，在 SAR 测量之前无须决定后续步骤。在 SEMCAD X 树状文件夹视图中可选择重要的量值（如电场场强、SAR 值）和量值评估方法（如插值和平均）。
- 在测试时可以查看设置的程序以及导入的参数，在执行测试后更方便地检查测试工作是否正确。
- 如果设置不正确（例如组织模拟液参数的设置与实际不同），事后可重新纠正，然后根据正确参数重新计算结果（权限需管理员访问等级）。

不同法规标准有不同的结果存档要求。DASY5 导出报告包含输入相关参数及完整的测试文档结果，测量结果可导出为文本文件。

2.4.12 SAR 测试的时间优化

完成一项 SAR 测试需要花费的时间是一个很显著的成本因素。DASY 系列 SAR 测量系统为了降低这一负担，进一步优化了机器手臂运动以及机器手臂与测量服务器之间的通信，

以加快测试速度。作为进一步加速 SAR 测试的有益补充，DASY5 系统提供了多个已经经过验证的算法。

DASY 系统随着研发版本升级，优化了机器手臂运动及其与测量服务器的通信，减少了 SAR 测量的时间开销。

在快速 SAR 算法方面，DASY5 提供了可以使操作员进行快速 SAR 值评估的一系列特殊软件功能。快速 SAR 算法尽管与 SAR 测量标准法规不完全符合，但有较高的准确度，可用在对辐射源的 SAR 预测试中。

快速 SAR 算法是基于平面区域扫描测量，由设在 Ft.Lauderdale 的 Motorola 研究小组开发和验证的，应用了依赖于频率的衰减参数。衰减参数是根据大量手机 SAR 测量结果分析得出的。

Motorola 研究小组最初的研究是基于线性拟合发展的近似算法。使用了 55 个手机的 264 次 SAR 测量数据，在宽频范围 136MHz~2450MHz 上对 1g 和 10g 空间平均 SAR 值的实际模拟，证实了算法的准确性。对于所研究的样本集，算法得出的 SAR（1g）和 SAR（10g）均方根误差分别是 1.2% 和 5.8%。该算法具体细节在 2004 年 8 月刊登在 IEEE transactions on MTT 特刊上。

该研究小组进一步用多项式拟合优化了算法，使得频率有效性扩展到了覆盖 30MHz~6000MHz 频率范围。研究细节可在 BEMS 2007 Proceedings 找到。

在 DASY5 软件有 Motorola SAR 值评估时间优化算法，如图 2-41 所示。

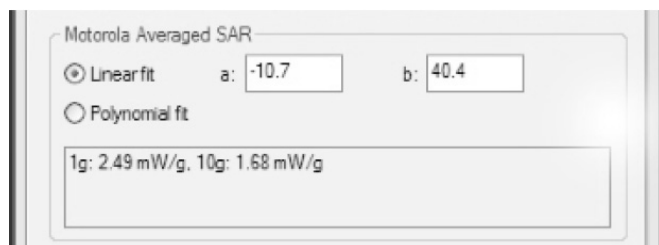


图 2-41

2.5 应用软件概述

在 DASY5 软件中，每项 SAR 测量作业对应一个 SAR 测试文档文件，包含该 SAR 测量作业的定义、初始设定、流程运行以及测量数据。每个测试文档可建立一个或多个配置（configuration）。每个配置由设置（setup）组成，描述测量实验用到的组件和流程。在流程中明确了一系列测量作业。




用 DASY5 软件打开一个测试文档，全屏窗口分为以下几个子面板。



- 设置（setup）面板用来列出用于测试的所有组件的名称。仅显示当前处在活动状态配置所包含的组件。
- 配置（configuration）面板列出了配置集，每个配置包含一个或多个流程和作业。同一时间只能有一个配置是活动的，非活动的配置会以红色“×”标记。在活动的配置中，可定义一系列测量流程和作业。
- 测量（measurement）面板列出上次测量的值，包括 DAE 读取的原始数据及导出数据。

可显示最近 50 次测量结果时间图线。

- 3D 面板显示测量实验中实体组件的三维视图，例如机器手臂、假人模型、探头及被测设备 (DUT)。
- 消息栏 (message bar) 停靠在 DASY 软件窗体最下端。它列出了测试信息 (蓝色)，警告消息 (黄色)，以及错误消息 (红色)。消息栏可从视图菜单消息选项开启或隐藏。如果出现报错，隐藏的消息栏会自动弹出，操作员可读取消息说明。

面板相对大小可通过拖动窗口分割框来调整，窗口布局包含主窗体 (即当前活动测试文档窗体) 的大小和位置。菜单选择 **Window**→**Save Window Layout** 可保存当前窗体布局。在 DASY5 软件运行时，若要恢复窗口布局，选择菜单路径 **Tools**→**Preferences...**→**Restore window layout when DASY5 starts**。

在 3D 面板窗体中显示了机器手臂、探头以及假人模型的位置。在该窗体可预览测量网格以及相对于假人模型的探头位置。当测量计划包含了机器手臂和假人模型，在测量进行中，机器手臂的运动模拟演示出来。演示的位置和角度可用鼠标在面板窗体中调整，也可用工具栏按钮操作，按住鼠标左键与对应，是拖动；按住鼠标浏览滑轮与对应，是平铺展开；按住鼠标右键与对应，是视图放大。

工具栏的表面位置标记按钮可帮助识别假人模型表面上的位置。将光标在假人模型测量区域移动，单击鼠标左键，将在三维视图中显示一个黄色标记指向模型表面的被选中点，其坐标和表面法向角度会显示在消息面板。为将探头末端移动到该指定点，可在工具栏中使用 **Move** 命令，点击按钮，选择 **Move to: Surface location marker**。

当在 x , y , z 轴方向浏览三维模拟窗口时，在状态栏会显示假人模型坐标下鼠标光标的位置。可用工具栏按钮选择其中一个原始视图，按钮有：**Left View**, **Right View**, **Top View**, **Bottom View**, **Front View**, **Back View**。

测试文档命名保存时 DASY 软件会自动添加 “da53” 扩展名。常用菜单路径如下：

- **File**—**New** 可为 DASY5 测量创建一个新的测试文档。该测试文档设置 (setup) 用当前默认模板预设。
- **File**—**Open** 打开已存档的 DASY5 测试文档。DASY5 软件可打开 DASY4 测试文档。
- **File**—**Save**, **File**—**Save as...** 保存活动文档内容。该文档扩展名必须是 “da53” 或 “da52”。若在存档时未添加后缀名，软件会自动添加。如果只有一个配置，也可保存为经典的 *.da5 文件格式。
- **File**—**Export** 可将当前活动文档测量数据导出，按行列格式保存为 Microsoft Excel 文档。

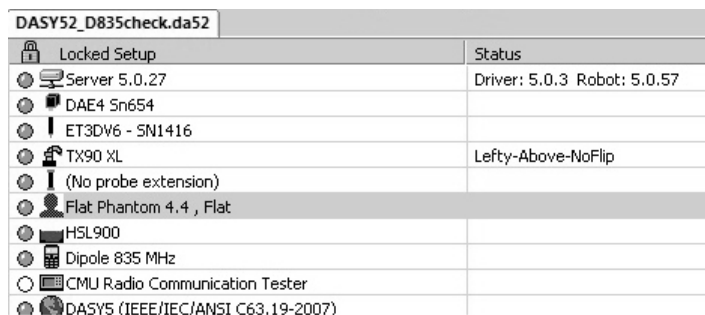
注意，测试文档 *.da53 文件格式不兼容 DASY5 V52.8 之前的版本软件，因为 DASY5V53 使用了新的适合大规模测试网格数据保存的文件格式。在测试文档保存前，可进行任何设置更改以及测量数据写入。作为可选，通过菜单路径 **Tools**—**Preferences...**—**Auto-save after each measurement job** 激活 DASY 软件自动保存功能，将在每个测量作业完成时自动保存测试文档。

2.6 应用软件设置



DASY5 软件组件设置采用了多参数结构表，其中一些参数与组件相关，且操作员无法编辑 (例如探头校准参数)。其他一些参数随不同 SAR 测量任务作业可能会有差别 (例如组织

模拟液参数、扫描设置, 评估设置)。为了更好地总览, 在 DASY5 软件中, 参数按组件或数据集排列, 每个参数条目及其值都赋予一个特定名称。设置中的所有条目都可由操作员在测试文档之间自由地拖放和复制引用。当前活动组件条目在设置面板列出, 如图 2-42 所示, 包括测量服务器, 数据采集单元 (DAE), 探头, 机器手臂, 探头拓展件, 假人模型, 组织模拟液, 被测设备 (DUT), 无线通信综合测试仪 (CMU), 测量标准/法规。



Locked Setup	Status
Server 5.0.27	Driver: 5.0.3 Robot: 5.0.57
DAE4 Sn654	
ET3DV6 - SN1416	
TX90 XL	Lefty-Above-NoFlip
(No probe extension)	
Flat Phantom 4.4, Flat	
HSL900	
Dipole 835 MHz	
CMU Radio Communication Tester	
DASY5 (IEEE/IEC/ANSI C63.19-2007)	

图 2-42

在设置面板中, 鼠标右键单击每个组件条目可得到对应指令的文本菜单。按照不同的访问权限, 可选择全部或部分命令。设置菜单与工具栏主菜单同样提供了剪切、复制、粘贴以及删除等常用命令, 此外文本菜单命令还包括:

Install (安装) ... 将被选用的组件与测量中实际选择并已安装的组件进行登记。只有当测试文档中所有组件设置完成之后才能开始测量。

Uninstall (卸载) ... 从已安装的全体组件之中移除某个组件, 但不将该组件条目从测试文档的设置面板中删除。

Align Probe in Lightbeam (探头用激光束对齐) ... 执行机器手臂命令, 利用激光束将探头与固定安装的激光束单元进行对齐。激光束单元安装在机器手臂底座或假人模型桌子上。

New (新建) ... 按当前已选中组件类型创建一个新组件条目。

Import (导入) ... 导入一个已存档的配置文件 (扩展名: *.cf53, *.cf52, *.cf5, *.cf4, 或*.cfg)。

Export (导出) ... 将选中组件条目内容保存为配置文件 (扩展名: *.cf53, *.cf52, *.cf5, *.cf4, *.cfg)。

Properties (属性) ... 显示被选组件相关参数。双击该组件条目, 同样可显示属性表。

设置窗口中每个组件的属性表都有通用条目选项卡, 包含如下设置输入:

- **Name (命名) ...** 描述组件的名字。
- **Type (类别) ...** 组件的类别。
- **Serial Number (序列号) ...** 组件的序列号。
- **Calibrated (校准) ...** 组件的校准日期。
- **Notes (标注) ...** 可填写补充资料。

按照访问权限可设置组件界面上的控制域和数据域。如果该设置项是被锁定的, 数据域以只读方式显示。在每个 SAR 测试实验室, DASY 软件的不同操作员可定义不同的配置文件, 在硬盘上按不同目录存档。可从 Tools→Preferences...→Directories 中指定当前用户的选择。

在开始测量前, 需要将所有组件一一安装。安装的组件必须与测量中实际使用的设备一一对应。DASY5 软件将已安装组件的说明保存在一个隐藏的默认设置中 (\\Configuration\\文件夹下 Setup.xml 文件)。直到操作员对其执行卸载, 已安装的组件会一直被保留着。新建测试文档中设置窗体的组件条目列表里将列入所有已安装过的组件名称。

在测量任务作业启动后, 测试文档的设置将会锁定, 该设置不能修改, 只可查看。管理员访问级别的用户可通过菜单 File→Unlock Setup 对锁定的设置进行覆写。挂锁图标会指示设置在当前是否已锁定, 或在测量完成后是否已解锁。

在设置窗体中, 每个组件的状态信息由颜色指示器标示。

- 白色: 该组件未被安装。
- 红色: 该组件已安装, 但是因未上电、失灵、设置错误而没有就绪。
- 黄色: 该组件已经安装且就绪, 但未被设置为最高可用精度。(如当探头未进行激光束单元对准, 探头组件会显示为黄色。当测量标准选用了非 IEEE/IEC 标准, 标准/法规组件也会被显示为黄色)。
- 绿色: 该组件已安装, 且已就绪, 可用于测量任务作业。

2.6.1 数据采集单元

DASY5 系统可使用的数据采集单元版本是 DAE4 和 DAE3。如图 2-43 所示, 操作员只有具有高访问级别才能修改 DAE 设置对话框 “General” 界面中的信息。SPEAG 公司进行 DAE 出厂校准, 校准数据存放在 U 盘交给客户。操作员具有管理员访问级别时可在设置面板中导入校准数据。

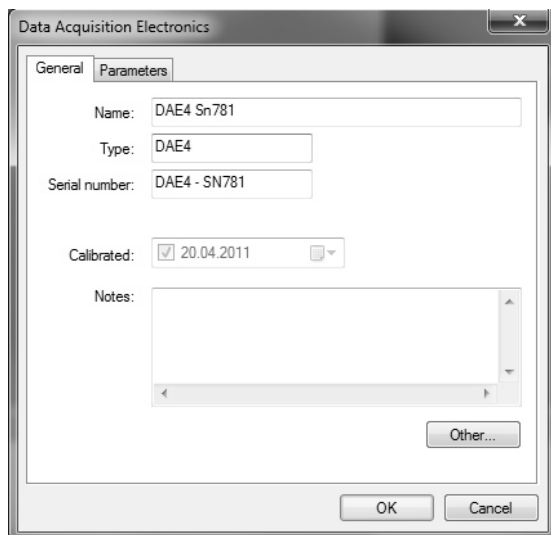


图 2-43

DAE 规格参数界面如图 2-44 所示, DAE 量程、输入电阻、输入电容等参数与 DAE 校准数据对应, 这些参数操作员/用户无法修改。连接器旋转角度用来将探头的场强 x 分量传感器与测量网格对齐。

DAE 在年度重新校准之后, 操作员需用新的校准数据文件覆盖旧的校准数据文件。

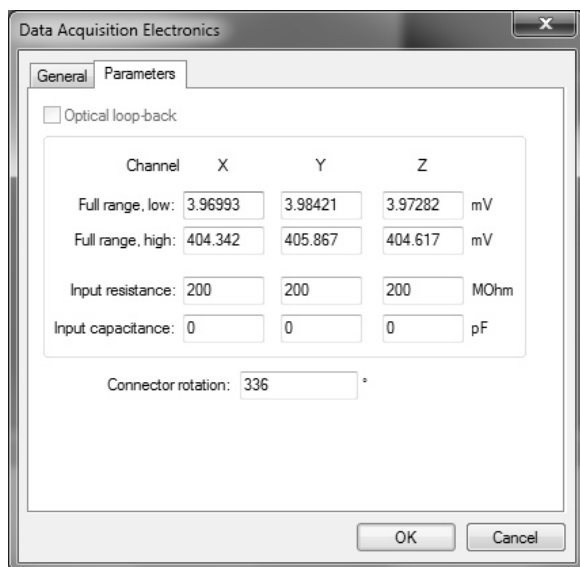


图 2-44

2.6.2 探头

探头通过连接头安装至数据采集单元，DASY5 软件可使用以下不同类型的探头。

- 比吸收率探头 (DASY5 SAR, PRO, NEO)。
- 电场探头 (DASY5 AIR, PRO, NEO)。
- 磁场探头 (DASY5 AIR, PRO, NEO)。
- 伪矢量探头 (DASY5 PRO, NEO)。
- 温度探头 (DASY5 SAR, PRO, NEO)。
- 音频磁场探头 (DASY5 AIR, PRO, NEO)。

电场探头最常用，伪矢量场强探头在 SAR 测试中不常用，它是为了获得场幅度和相位信息。音频磁场探头在助听器兼容性测试中使用，需要使用 T 线圈扩展件。

属性界面 General (通用)，Mechanical (机械)，Modulation (调制) 和 Surface detection (表面触碰探测) 四项属性适用于所有类型探头。

(1) 机械属性界面。

其作用是保存探头机械属性数据，建立从机器手臂的工具夹具到探头末端坐标转换。在激光束探头对齐操作中，也使用到这些数据。若选择勾选框将场强 x 分量传感器与测量网格对齐，DAE 连接头将转动探头，使 x 通道传感器将与测量网格 x 轴平行。此时传感器与探头轴垂直，优化原始数据读取。

如图 2-45 所示，示例描述了 EX3DV4 探头的机械尺寸。其他类型探头的机械属性规格数据在相应配置文件中。

(2) 表面触碰探测属性界面。

在界面中，定义了所用探头和 DAE 是否支持光学、机械或同时两种表面探测触碰，如图 2-46 所示。

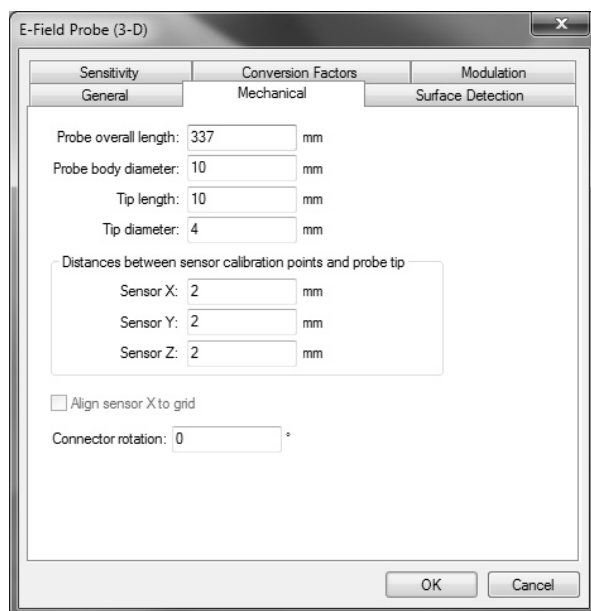


图 2-45

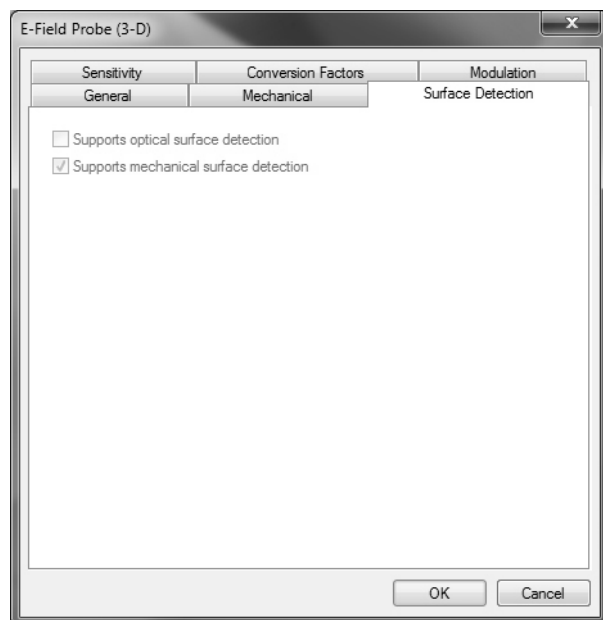


图 2-46

（3）调制属性界面。

调制属性界面定义了探头对不同信号调制的响应校准数据。探头读出的均方根电压值是按不同调制协议对应的测量时间段信号的均值。为了补偿非线性因素或不同调制协议使用的不同灵敏度值，探头配置文件包含了探头调制响应校准参数，如图 2-47 所示。

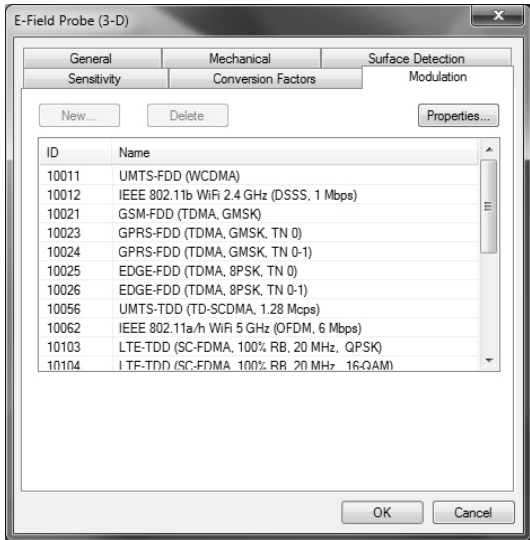


图 2-47

(4) 比吸收率探头。

按照激励电场与探头材料的相互作用，在自由空气环境（兼容 DASY5 AIR, PRO 和 NEO 等级系统）或有耗液体中（兼容 DASY5 AIR, PRO 和 NEO 等级系统）进行测量电场场强测量用到了不同类型的电场探头。在空气环境测量用到实验空间评估和计量测定评估。这两种类型电场探头都需要在空气环境中采用标准定义的程序进行校准，在灵敏度界面指示了校准参数。此外，比吸收率探头需要在不同频段组织模拟液环境中进行专门的校准，校准结果是转换因子，在转换因子（Conversion Factors）界面显示。

转换因子定义了每个探头对于在特定液体环境相比在空气环境中场强传感器转换灵敏度之比值。需要对探头定义其在每种媒质和频率范围（例如，头部 900MHz 组织模拟液）对应的转换因子。在对探头进行校准过程中确定转换因子数值及其有效适用频率和背景媒质介电参数范围。转换因子界面中的数据与探头校准数据文件对应，使用者不应对其进行修改。转换因子界面如图 2-48 所示。

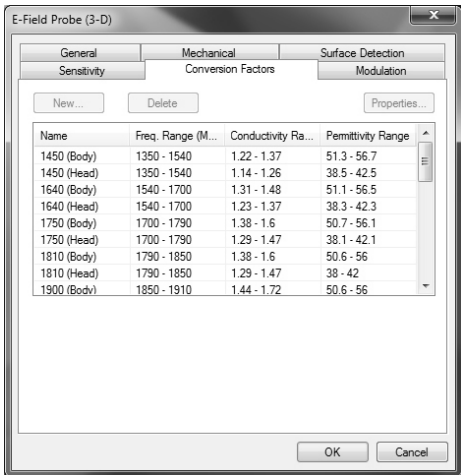


图 2-48

在管理员或更高访问权限下可创建对应于不同频率或液体参数的转换因子条目。如图 2-49 所示, 点击 New...按钮, 除了输入转换因子数值, 还需要输入其他参数 (如边界效应因子 Alpha 和 Depth) 以及相应的有效频率范围和液体介电参数范围。

图 2-49

需要注意的是, 在空气环境中使用的电场探头属性界面条目应按照如下设置: Conversion factor=1.0, Alpha=0, Depth=1.0, Conductivity range: 0 to 0, Permittivity range: 1 to 1。最后写明探头频率范围。

若组织模拟液属性界面填写的媒质参数无法与探头转换因子属性中设置的有效范围匹配, 管理员可以稍微增大探头属性界面中介电常数和电导率的有效范围。类似地, 当设备工作频率略高出或低出探头转换因子频率范围时, 也可如此解决。但一定要特别注意上述人为操作, 因为可能会增加整体的测量不确定度。

(5) 各向同性空气环境电场探头。

各向同性空气环境电场探头针对自由空间电场强度评估 (兼容 DASY5 AIR, PRO 和 NEO 系统等级), 并进行了优化。属性条目 “Align sensor X to grid” 角度定义了将探头 x 分量传感器转动至与网格对齐所需的角。按此功能, 由于探头中三分量传感器之间相互垂直, 因此读出的三个场分量功率值之和即是总场功率值。相应的属性界面如图 2-50 所示。

图 2-50

灵敏度因子数据与探头校准文件对应, 在用户或管理员模式都无法修改。灵敏度因子(灵敏度, 二极管压缩点)在测量数据读取中使用。

(6) 各向同性空气环境磁场探头。

磁场探头(兼容 DASY5 AIR, PRO and NEO 系统等级)有特定的灵敏度设置界面, 如图 2-51 所示。磁场探头无须在组织模拟液中进行校准, 测量环境对于该灵敏度是透明的。

探头灵敏度数据同样与校准数据对应, 且用户或管理员模式无法修改。相比电场探头, 磁场探头频率特性取决于更多参数。

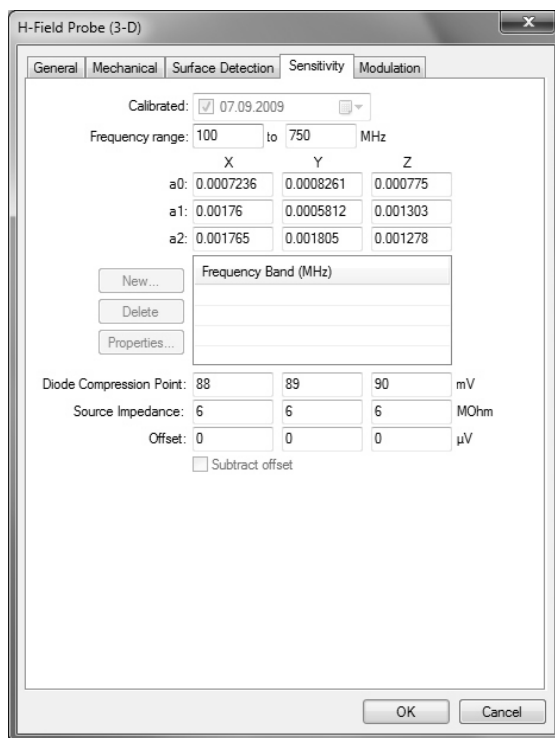


图 2-51

(6) 温度探头。

温度探头(兼容 DASY5 SAR, PRO 和 NEO 系统等级)基于 NTC 传感器和电阻线。可用于一般温升测量, 在小体积高功率等级比吸收率测试中, 可同场强探头比对, 进行温度传递校准。

温度探头的灵敏度因子是针对特定温度范围的, 通过校准过程得出。设置界面如图 2-52 所示, 数据来自校准文件, 用户和管理员访问等级无法修改。制造厂商提供阻抗 (Impedance) 和分流器电压 (Shunt voltage) 的数值。

数据采集单元读取 NTC 电压 U_y 和分流电阻电压 U_x 和 U_z 的温度 (单位: $^{\circ}\text{C}$) 通过下式进行计算:

$$T = a \cdot \log\left(\frac{x+d}{1-b \cdot x}\right) + c, \quad x = \frac{2U_y}{U_x + U_z}$$

a , b , c , d 是探头通过校准得出的灵敏度因子。

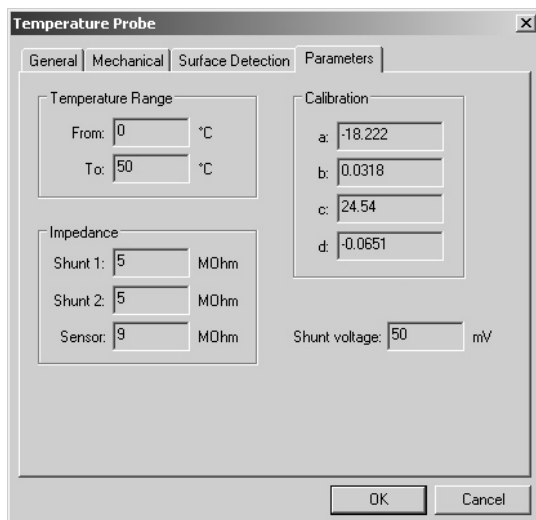


图 2-52

2.6.3 机器手臂

机器手臂的参数是制造商写入的, 用户无法修改。DASY5 软件支持多种机器手臂类型(如 TX 60L, TX 90XL 或者 RX 160L)。SPEAG 公司或代理商会根据特定的 SAR 测量 DASY5 系统选择适合的机器手臂配置文件。

如图 2-53 所示是机器手臂属性配置界面。DASY 系统激光束单元的安装情况以勾选框“Lightbeam”和“Alternate lightbeam”指示: 是否安装主用、备用激光束单元。若系统有备用激光束单元, 可在 Install Robot 对话框里切换实际使用的激光束单元。

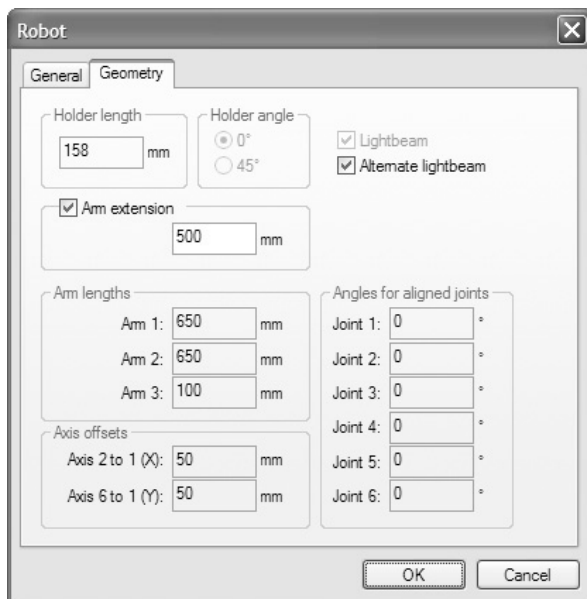


图 2-53

支架长度是固定的, 对于 TX60L 型号, 支架角度是 45°, 对于 TX90 (L) 支架角度是

0°。各段手臂长度和各个关节角度数值：一是用来计算机器手臂运动；二是用来预估潜在触碰。这些数值是由制造商设置，用户无法修改。如果用到手臂延长件，需要确认其长度，并选中该勾选框“Arm extension”。

2.6.4 假人模型

每个假人模型被划分为一个或多个既定的测量区域（区段）。每个区段至少有 4 个预设的位置点。

(1) 被测设备 (DUT) 参考点：位于假人壳体外表面，用来定位被测设备。

(2) 网格参考点：是测量网格的锚定点。位于假人壳体内表面，在 DUT 参考点上方。

(3) 区段原点：位于该区段组织模拟液体内部。探头末端随机器手臂运动可触及该区段中该点上方任意位置。如果在网格逐点扫描过程中，机器手臂无法从一个测量点直接地移动到下一个测量点，DASY 软件会将探头先回撤至原点，再从原点移动至网格点。

(4) 停车位置：在区段原点正上方，在组织模拟液之外。

(5) 脸颊参考点 (CRP)：韩国 SAR 测量标准 MIC# 2000—93 用到 CRP。

假人模型的设置界面如图 2-54 所示。最小倾斜角 (Minimum pitch) 是为探头方向设置安全限。当探头垂直朝下，即相反方向平行于假人模型 z 轴，pitch 角度是 180°。将最小倾斜角设置为 135° 即是允许探头离开垂直方向最大允许 45° 倾斜。

当选中勾选框“Show selected section only”，在 3D 窗体中未被选中的假人区域将全部被隐藏。如果用户是在管理员访问模式，额外的点（或被定义的测量位置）在每个部分可以用新建按钮实现。例如，在不同的作业类型的网格。

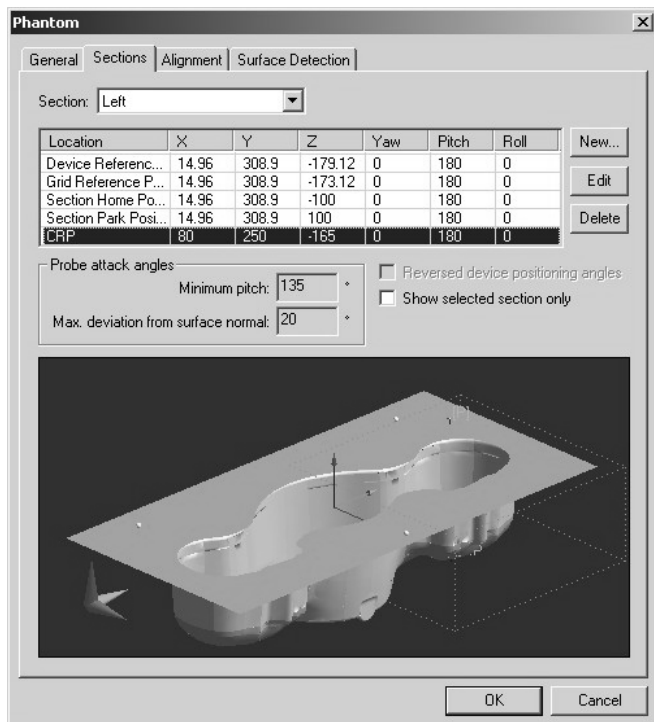


图 2-54

当操作员具有管理员访问权限时, 如图 2-55 所示, 用 New...按钮在假人每个区段可以自定义位置点或预定义测量位置点, 便于不同任务作业下设置不同的参考位置点。输入新的位置点既可给出其机器手臂坐标系坐标 (x , y , z 和 Yaw, Pitch, Roll 角度), 也可直接给出三组直角坐标 P_0 , P_x , P_y 。其中 P_0 是用户指定位置点的 xyz 坐标, 该位置点处的方向坐标系由 P_x 和 P_y 给定, P_x 在 x 轴上, P_y 在 y 轴上。操作机器手臂运动到指定点既可通过在对话框中写入位置点和姿态角数值, 也可通过操纵手柄。

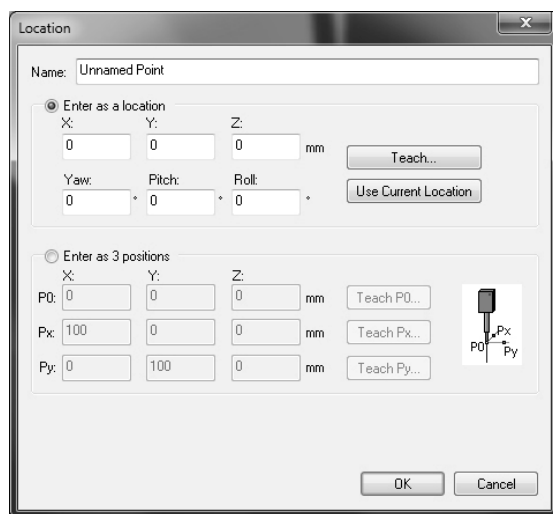
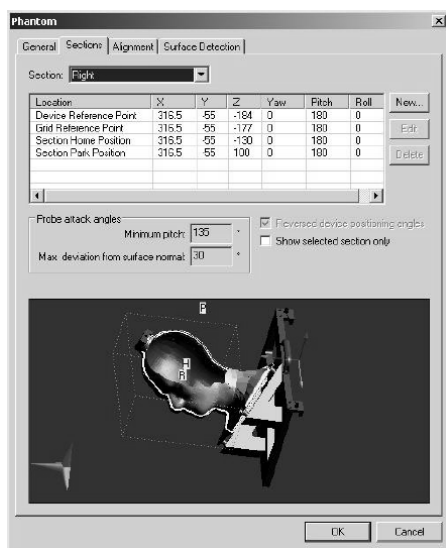
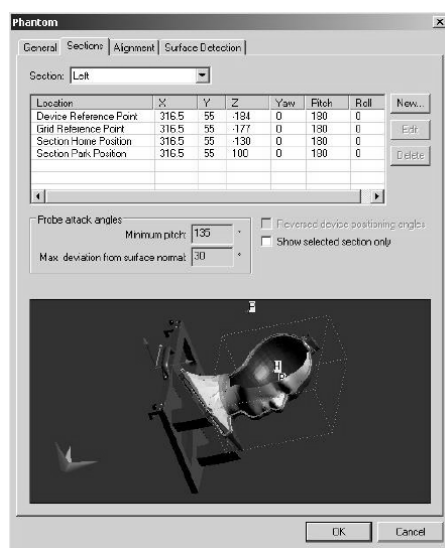


图 2-55

对于头部假人模型的某些区域 (如嘴部), 需要将经典的双半头 SAM 假人模型旋转一定角度, 以便探头可伸入到这些区域。SPEAG 公司制作了 Chin-20 假人模型, 它是双半头 SAM 假人模型的左半头、右半头部分, 如图 2-56 所示。



右



左

图 2-56

假人模型通过其 CAD 模型管理, CAD 模型描述了其各个区段及其描述数据。在每个区段内, 定义了测量区, 即探头运行的边界, 以避免探头触碰到假人壳体。对于头部模型 SAR 测量, 按照最新的测量标准, 探头要与头部模型壳体表面垂直。由此可见, 在使用假人模型之前要仔细检查并确认最小倾斜 (Minimum Pitch) 角度、表面法向最大偏离 (Max. deviation from surface normal) 两项设置值。

假人区域各个点空间坐标用三个参考点定义, 以便于在全局机器手臂坐标系和假人坐标系之间转换。有了三个参考点, 可给出各个测量点相对位置。在实验室里重新摆放假人模型之后, 通过操纵手柄分别将探头末端与三个参考点进行对齐 (Alignment) 操作即可, 对话框界面如图 2-57 所示。

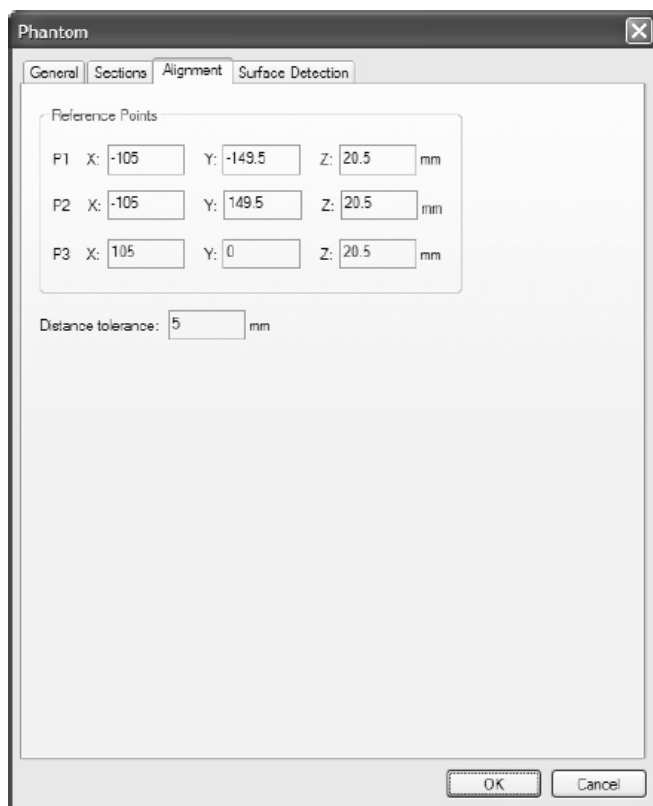


图 2-57

假人表面触碰探测 (Surface detection) 界面如图 2-58 所示。在属性设置中列出了当前 DASY 系统可支持的表面触碰探测方式。触碰探测方式需要所使用的探头允许触碰。光学式触碰探测要求所用的组织模拟液是透明的, 假人模型内壁是白色的。在表面探测启动距离 (Surface detection start distance) 条目中设置的是接近点。在探测中, 探头以较高速度朝接近点运动, 在距离假人表面 10mm 或 20mm 时, DASY 系统即开始搜寻假人表面实际位置。如果使用的假人模型表面在深度方向有较大起伏, 在管理员权限下可将表面探测启动距离设置为 100mm, 由此可处理表面高低起伏达到 120mm 的假人模型。



图 2-58

使用 SEMCAD X 可创建 DASY5 假人 CAD 模型。用户购买了 SEMCAD X 的完整许可证，即可创建结构复杂的假人模型。在 SEMCAD X 中，假人模型区段分为可测量区域和不可测量区域（以“!”开头命名的区块），例如鼻子是双半头 SAM 假人模型的不可测量区。测量网格直角坐标只能被映射到可测量区。用户可人为地添置虚拟的不可测量区域，以限制探头的运动范围。由于半头模型连到桌面的开口面比真实情况的面积小，设置不可测量区域可避免探头触碰到开口边缘。

创建的假人模型以 3DS 格式文件存档。在 DASY5 软件中，从 3DS 文件产生定制假人模型的步骤如下。

- ① 进入管理员访问权限。
- ② 打开一个新的 DASY5 文档。
- ③ 找到设置面板的假人模型条目的文本菜单，选择：新建（New...）。
- ④ 在下拉列表中选择新建假人模型的类型，选择普通的 Phantom 条目。
- ⑤ 打开新建假人模型的属性表单。
- ⑥ 填写通用（General）属性界面（DASY 软件仅仅以名字识别不同的假人模型）。
- ⑦ 在区段（Section）属性界面，点击导入模型（Import Model...）按钮，载入用 SEMCAD X 创建的 3D 模型文件 (*.3ds)。
- ⑧ 至少创建一个新的区段，名称与 SEMCAD X 中创建的区段名称一致。
- ⑨ 编辑区段的预定义区域。
 - 设备参考点（Device Reference Point）是被测设备（DUT）摆放位置的固定点，人头模型上通常设置在耳廓开口的外部。
 - 网格参考点（Grid Reference Point）是默认的测量网格的锚定点。人头模型通常将该点设置在耳廓开口的内部。
 - 返回位置点（Home Position）通常在液体内部。探头末端在该点与测量网格点之间需

可安全移动。

— 停车位置点 (Park Position) 通常在液体外部，假人模型上方。

⑩ 假人模型通常摆放在机器手臂前方。在机器手臂坐标系中， x 轴从机器手臂基座指向正前方， y 轴指向右方， z 轴指向正上方。用操纵手柄训练机器手臂，可确立假人模型的位置点与机器手臂的相对联系，即用假人模型上的三个参考点确定假人坐标系和机器手臂坐标系转换关系。参考点 P_1 ， P_2 ， P_3 在假人属性界面，以假人坐标给定。参考点 P_1 和 P_2 定义了假人 y 轴，再利用 P_3 定义了假人 x 轴。在定制假人模型的对齐 (Alignment) 属性界面输入参考点坐标。

对于在空气环境中进行场强测量，DASY 系统 (AIR, PRO, NEO 系统等级) 支持空气环境虚拟假人模型。该假人模型并不对应物理实体。坐标系采用机器手臂坐标系，测量区域的大小取决于机器手臂长度和关节活动角度。用一个虚拟的矩形设置可运动的区域，该矩形应位于机器手臂坐标系 xoy 平面，可测量区域 z 坐标 >0 ，网格点 xy 坐标应位于矩形内部，因此，也可称之为底部矩形。空气环境假人属性界面设置如图 2-59 所示，管理员访问权限下可定义一个或多个区段，每个区段可用新建 (New)、编辑 (Edit)、删除 (Delete) 用户点。

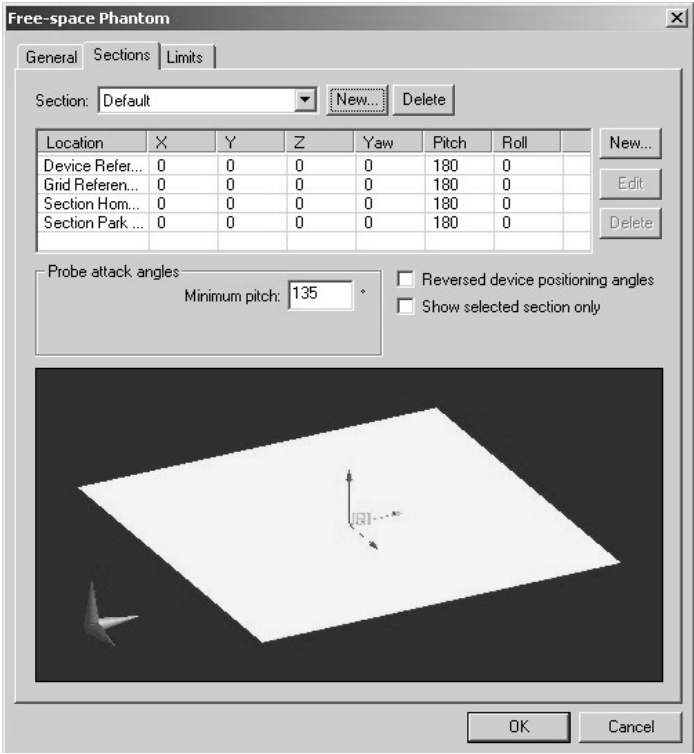


图 2-59

为避免探头触碰，参考点必须设置在 DUT 以及其他设备上方。探头垂直向下，决定了测量网格水平面与探头轴向垂直。底部矩形长宽范围设置界面如图 2-60 所示。DASY 软件只检查有物理实体的假人模型边界以及防止触碰。对于空气环境假人，操作员应当保证测量范围安全无触碰。



图 2-60

通常用户自制的假人模型（或比吸收率验证直波导）形状是方盒子，为实现在这种形体简单的用户自定义假人（平坦模型）中测量，DASY5 软件提供了定制的简单盒体假人模型（Simple Box Phantom），使用户根据平坦假人模型生成自己的 DASY 假人模型配置文件。在 DASY5 软件中，该模型类型与双半头 SAM 假人模型类似。创建这种简单的盒体假人模型需要管理员权限。

创建简单盒体假人模型简述如下。

- ① 在 DASY5 软件测试文档设置窗体选择假人模型（Phantom）条目，在文本条目中选择。
- ② 点击新建（New...），选择简单盒体假人模型（Simple Box Phantom）。会弹出该新假人模型属性表单。该模型不必用 3D CAD 模型定义（不同于双半头 SAM 假人 CAD 模型），可直接给出各个尺寸。

③ 在尺寸（Dimension）界面输入尺寸。开口大小由内部宽度（Inner width）和内部长度（Inner length）定义。框架宽度（Frame width）定义壁厚。简单盒体假人模型的属性界面如图 2-61 所示，这个壁厚被固定在 10mm。另外还可编辑底板厚度。

简单盒体假人模型坐标系原点位于底部上表面中心点。参考点 P_1 、 P_2 和 P_3 在上部表面的四个角上，圆心沿 x 和 y 方向朝内偏 10mm，可在对齐（Alignment）界面查看，但不能编辑。模型尺寸设置完毕后，操作员可在区段（Sections）界面设置被测装置参考点（Device Reference Position）、网格参考点（Grid Reference Position）、区段返回位置点（Section Home Position），以及停车位位置点（Section Park Position）。作为默认，高度为 200mm，底板厚度 2mm，被测设备参考位置在底板下表面，即 $z=-2\text{mm}$ 。网格参考点在 $z=0\text{mm}$ 。停车位位置点在模型上方 100mm。如图 2-62 所示，该简单盒体假人模型只有一个命名为 Flat 的区段。建议区段返

回位置点 z 坐标是内部高度的一半。

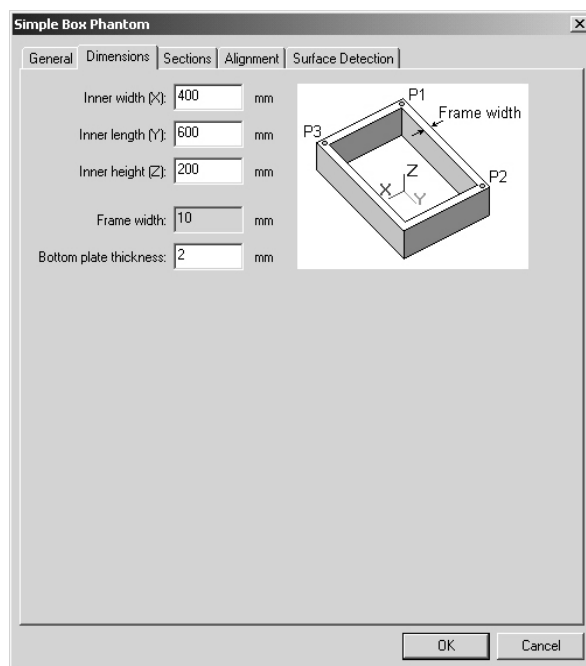


图 2-61

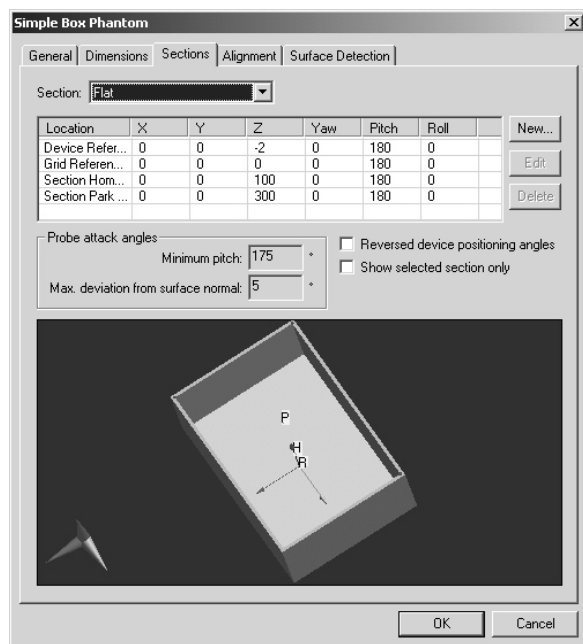


图 2-62

操作员按照假人模型自定义的位置点可通过机器手臂命令 Set user point from current position 重新设置，用来在测量程序运行过程中更新自设位置点。特别是当测量流程运行过程中，执行该条机器手臂命令，自设位置点的坐标将被改写成探头末端位置坐标，这可对自设

位置点按照模型实际位置进行校准，使用该功能需要管理员权限。具体操作上，在假人模型属性界面中，按照 Properties...—> Section—> New...，输入用户点的名字，其坐标可暂按缺省数值。在机器手臂运行过程中，通过机器手臂命令 Set user point from current position 设置坐标位置。

接下来，在测量程序中用 New——Robot Command 7.2.17 在被希望的位置插入机器人命令。在 Robot Command 对话框中从当前选择命令设置点，之外用户点的命名也应该被更新。位置对话框和机器手臂命令对话框分别如图 2-63 所示。

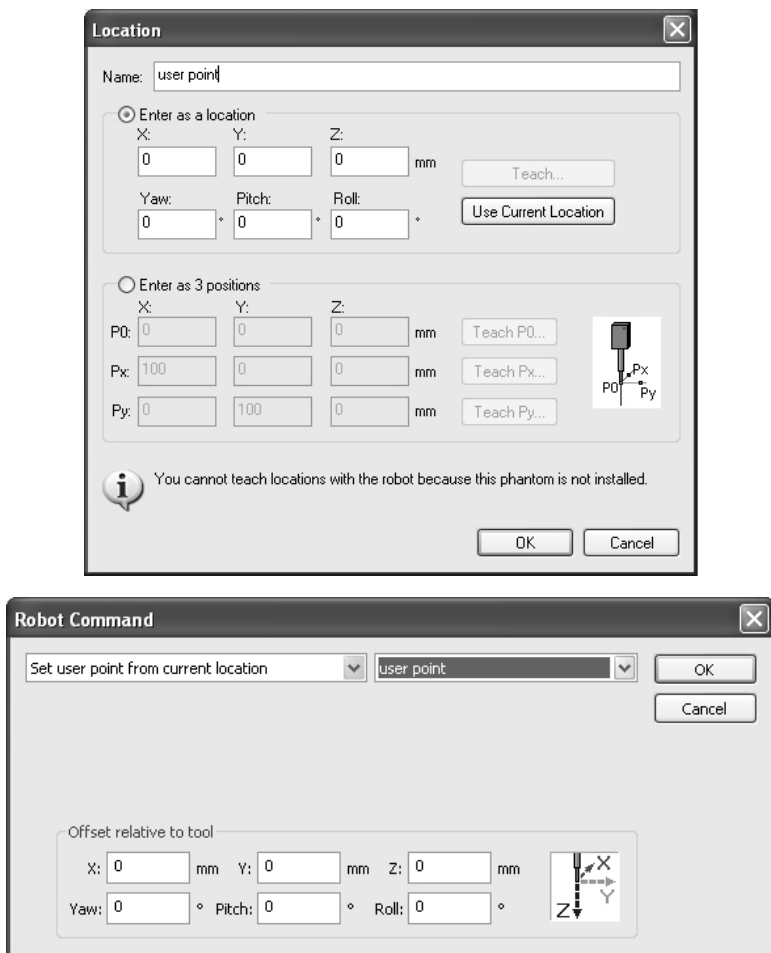


图 2-63

2.6.5 组织模拟液

组织模拟液的介电性质是用介质类型定义，即该液体的电导率（ σ ）和相对介电常数（ ϵ_r ）。此外，还需要指定介电参数数值成立的频率范围，以及目标人体组织的密度（ g/cm^3 ）。

如图 2-64 所示是组织模拟液设置界面。对于 SAR 测量探头，影响 SAR 值计算的是电介质的电导率和目标人体组织的密度，因此 DASY5 软件不要求给出组织模拟液自身的密度及其比热容。

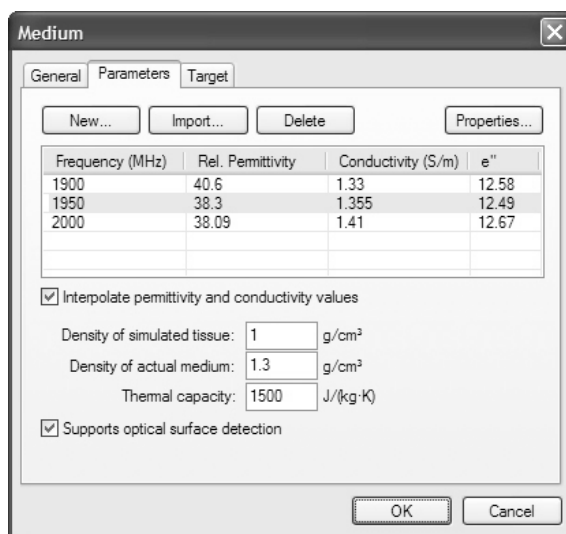


图 2-64

在普通用户访问权限即可创建新的组织模拟液条目或编辑已有条目。其中：

- 新建 (New...)：在指定频率点创建具有某个相对介电常数及电导率数值的组织模拟液条目。
- 导入 (Import...)：导入液体介电测量数据文件 (*.prn)，将其添加到清单，该数据文件是液体介电测量软件生成的（例如，DAK 软件）。
- 删除 (Delete...)：移除列表中可选择的组织模拟液条目。
- 属性 (Properties...)：从列表选中组织模拟液条目，编辑介电属性（相对介电常数，电导率以及频率）

若勾选框“Interpolate permittivity and conductivity value...”已被选中，将按照相应通信系统频率情况，在 50MHz 频率范围内对相对介电常数和电导率进行插值和外推，以便能更好地评定比吸收率数值。这个介质的参数是线性的可以被推算至与之相匹配的频率。若不选择该勾选框，在偏离指定值的频点上，将使用已有最接近频率点的介电参数值。具体方式如下。

① 若系统的频率落在介电频率表频段内，则直接使用该频率的介电参数值。

② 若系统的频率 (f_{sys}) 与频率表 ($f_{medi, j}, \dots$) 不匹配，则 DASY5 软件后期处理器检查是否存在媒质频率使得 $f_{medi} \leq f_{sys} \leq f_{medj}$ ，且 $|f_{sys} - f_{medi}|$ 和 $|f_{medj} - f_{sys}|$ 小于 50MHz。若频率差别较小，则用线性插值得出 f_{sys} 相应的介电参数值，并给出一般消息提示。若与已知的上界或下界频点其中之一偏差较大，同样按照线性插值方案给出 f_{sys} 相应的介电参数值，但提示警告消息。当 f_{sys} 小于介电频率表中最低频率或大于表中最高频率，则按照线性外推给出该频率点相应的介电参数值。提示一般信息或警告信息的原则与插值的情形相同，即若与已知频率点差别在 50MHz 内，使用线性外推时给出一般信息提示；若与最低或最高频率偏离超过 50MHz，则相应地直接采用 $f_{med-min}$ 和 $f_{med-max}$ 相应的介电参数值，并提示警告信息。另须注意，插值和外推都至少需要两个已知频率点。如果操作员只给出单一频点的介电参数值，则直接采用该数值求 SAR 值。

当组织模拟液足够透明时，可支持光学式表面触碰探测。这时可将勾选框“Supports

optical surface detection” 选中。

组织模拟液密度通常设置为 1.0, 代表实际头部组织的密度。

当用温度探头替代场强探头评估 SAR 值时, 需要填写组织模拟液的比热容。

设定 SAR 测量所使用组织模拟液介电参数目标值的原则是能够保守地模拟人体暴露量。需要将测量不确定度减少, 不超出目标介电参数值 $\pm 5\%$ 容差。有时在整个给定频段上可能很难做到。Motorola 研究小组提出了纠正由组织模拟液介电参数容差存在引起 SAR 值测量容差的方案, 该算法已被标准化委员会接受, 现已被添加到 DASY5 软件中。在目标值 (Target) 界面可将勾选框 “Use target values for SAR correction” 选中, 如图 2-65 所示。

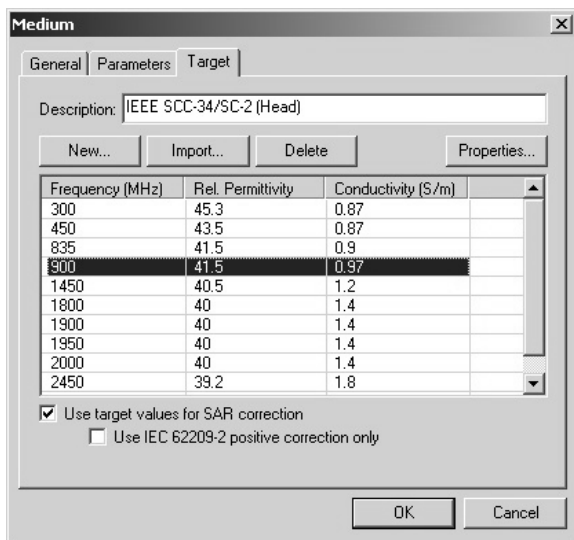


图 2-65

2.6.6 被测样品

DASY5 软件将被测样品 (DUT) 与假人模型按实际摆放位置布置在 3D 视图中, 使得测量过程装置组件的可视化更加具体、形象。DUT 的描述可支持多个配置组件, 例如天线、安装配件等可分别添加条目。对于每个配置组件, 可用 3D Studio CAD 模型 (*.3ds) 创建并导入, 在用户访问级别权限下也可由操作员创建简单的箱体模型。点击预览 (Preview) 按钮可显示渲染简单箱体模型的形状和尺寸。DUT 配置对话框如图 2-66 所示, 分别是用 CAD 模型和简单箱体模型配置 DUT。可在 SAR 测量标准 IEEE 1528-2003 文件中查找关于 DUT 配置输入参数的规定与定义。

DUT 射频信号参数 (如载波频率、调制频率、波峰因子) 不在 DUT 配置设置之列。这类参数作为测量流程的参数, 在配置通信系统 (Communication System) 时给定, 设置在测量任务作业中。

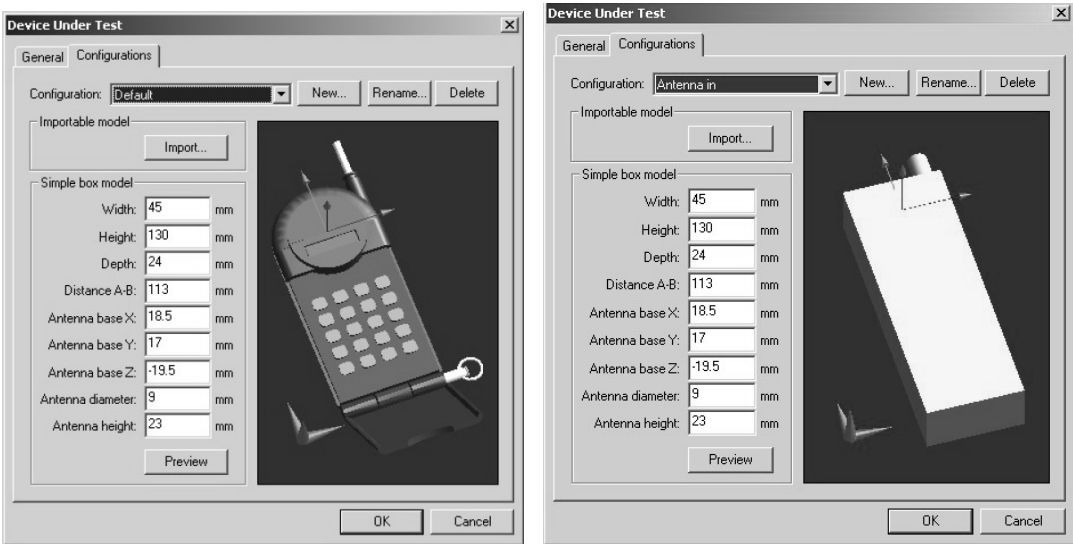


图 2-66

2.6.7 通信系统

通信系统（Communication System）即 DUT 的射频信号的协议和发送功率等级。在 SAR 测试 DASY5 系统中，通信系统的设置对数据采集有一定的影响。

在主菜单按路径 Tools—Communication Systems...可查阅到全部供用的通信系统条目栏，如图 2-67 所示。在每个通信系统条目中保存了 DUT 信号属性，通过名称（Name）、编号（ID）、组（Group）和注释（Notes）列出。对于场强功率读数的修正，ID 为 0 的条目是用于近似补偿，其他用于校准补偿。

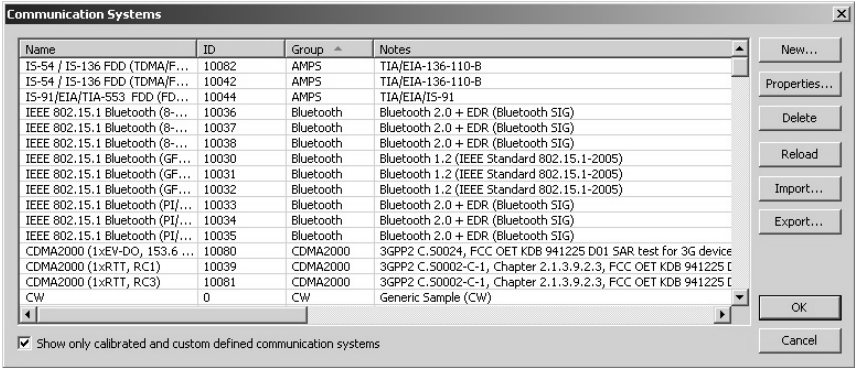


图 2-67

DASY5 V52 软件中，可指定通信系统所包含的各个频段，每个频段可指定预设定的各个频道。SPEAG 公司提供了通信系统表，包括了最广泛使用的各个通信系统（见程序文件夹的 Communication_Systems_SPEAG.xml 文件）。管理员还可添加额外的通信系统条目，存储在文件 Communication_Systems_custom.xml。通信系统配置文件的路径可在 DASY5 软件偏好设置中的“Communication Systems”目录条目指定。还可通过导入（Import）按钮继承通用通信系统（Generic Communication Systems）设置条目。通信系统（Communication Systems）设置

界面如图 2-68 所示。每种通信系统条目详细信息包括频道号码/代号对应的频率、波峰因子、调制频率等。

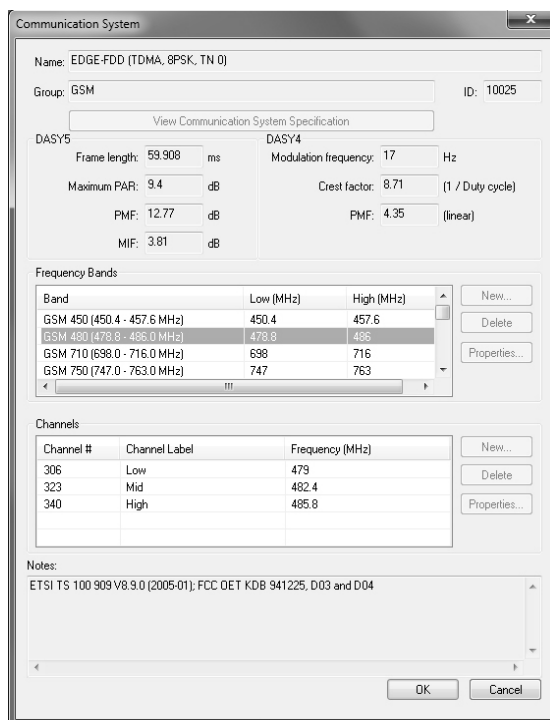


图 2-68

双击每个频道，弹出频道属性对话框，如图 2-69 所示。每个频道的频率表按照适用通信标准给出。

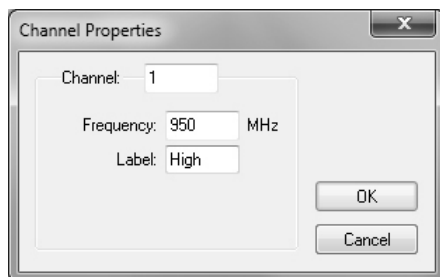


图 2-69

在管理员访问权限下用新建 (New...) 按钮可添加自定义的通信系统条目。在创建频段 (Frequency bands) 之后可创建频道 (Channels)，之后可编辑帧长度，PAR，PMF，MIF 等参数。若通信系统名称是连续波 (CW)，各个参数数值无法改动。

由于可能增加测量不确定度，不推荐使用通用通信系统 (Generic Communication Systems) 设置参数代替常用无线数字通信系统 (例如 WPAN, WLAN, UMTS, CDMA2000, TD-SCDMA, LTE 等)。建议用各种特定通信系统实际格式信号校准场强探头。

2.6.8 多标准兼容性

对手持无线设备 SAR 合规测试标准的统一化近年来已在全球范围内确立。SAR 测量标准 IEEE 1528—2003 和 IEC 62209 提供了定义完备、科学合理的标准流程，且在技术上一致统一。一些国家标准中的流程目前依然有稍偏离这些国际标准要求的情况。DASY5 软件为了也符合这些国家的标准，又提供了另外 2 种增设模式，目前有 4 种可用模式，常用模式 3 种。

① DASY5 (IEEE/IEC/ANSI C63.19—2007)。

该模式是默认模式，与最新标准完全兼容，为未来标准更新留出余地，如 IEEE 1528—2003，IEC 62209—1/2，ANSI C63.19—2007 等使用 PMF 的法规。

② DASY5 (IEEE/IEC/ANSI C63.19—2011)。

使用 MIF 的法规，可选择 ANSI C63.19—2011 标准，为助听器合规测试提供 SAR 评估。

③ DASY4 (Korean Std. MIC #2000—93)。

与韩国标准 MIC #2000—93 完全兼容。

操作员以管理员访问权限登录，在设置面板标准 (Standards) 条目栏用鼠标右键单击标准条目，在上下文本菜单选择用到的模式。对话框界面如图 2-70 所示。

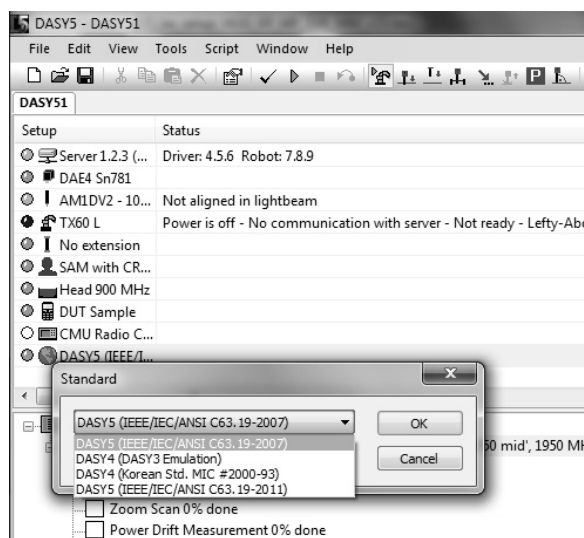


图 2-70

2.6.9 安装和卸载

进行测量前，需要安装设置面板中的每个组件。在设置窗体中该组件上下文本菜单中选择安装 (Install...)，该操作将卸除该组件现有安装的配置，重新安装所选择的配置。对于有特殊安装流程的组件，文本下方会给出详细信息。日常安装推荐顺序是。

- 安装数据采集单元。
- 安装探头。如此即可确认机器手臂支架工具的几何尺寸。
- 安装组织模拟液、DUT、通信系统。
- 对探头进行激光束对准。该操作可调整工具的设置尺寸，补偿探头安装的偏移。

- 安装新假人模型或验证已安装的实际假人模型参考点位置。

需要注意的是，设置面板中的“测量服务器”组件和“机器手臂”组件只需安装一次，即在 DASY5 系统首次安装过程中由 SPEAG 公司或代理商安装。下面分别介绍其他组件安装过程。

选择想要安装的探头时，仅需在文本目录中选中安装 (Install...)，同时也卸除了之前安装的探头配置文件。

安装探头之后用激光束单元进行探头对准。DASY 软件将新安装的探头以黄色指示标记为“Not aligned in lightbeam”。对准是为了消除实际的机械公差。尽管每个探头有给定的机械尺寸规格且 DASY 软件已自动计算了探头末端位置点，但探头自身实际或装配带来的机械公差可能会造成软件位置点与实际位置点偏离。以激光束单元做探头对准即是为了补偿探头实际位置与软件中设置的差异。在设置窗体中选择“Align probe in lightbeam...”选项。

激光束重复校准得出 x 和 y 方向位置点偏差的均方根值，当其大于 5mm 时校准失败，弹出错误信息“Probe offset too large”。出现这种情况，需要检查探头是否正确安装到 DAE 上，并检查探头与 DAE 整个组合是否正确安装到机器人支架上。

接着是在设置面板中安装机器手臂，使 DASY 软件获得机器手臂实际位置点信息。操作员需用管理员权限登录。用操纵手柄在人工控制方式下将机器手臂探头末端移动到特定位置点，并按下 F2 键，即可将位置点坐标输入 DASY 软件，需要操作三个位置点。

- 自由高度 (Free Height)：在此高度 (即 z 坐标) 之上，机器手臂可自由运动，不会与其他任何附近物体 (如激光束单元) 碰撞。
- 激光束单元位置 (Lightbeam Position)：激光束单元一般安装在机器手臂基座 (TX 90XL 型号) 上或木质基座桌 (TX 60L 型号) 上。需在 DASY 软件中指定激光束单元的位置。如图 2-71 所示，在 Install Robot 对话框中选择 Lightbeam Position，激光束单元的位置，按下对话框上的“teach”按钮。然后按照操纵手柄指示的说明操作。移动手臂分别至三个参考点完成三点定位后，系统将自动对激光束位置及方向进行细步长搜寻，读取坐标点显示在对话框“Lightbeam Position”文本条目。

Location	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Yaw (°)	Pitch (°)	Roll (°)
Free Height	0	0	35.06	0	0	0
Lightbeam Position	88.07	-506.4	-319.19	0	180	0
Alternate Lightbeam...	0	0	0	0	0	0
Park Position (Lefty)	450.54	16	-138.58	-11.48	179.22	-11.51

Buttons: OK, Cancel, Teach

Joint Limits

	J1	J2	J3	J4	J5	J6
Min.:	-180	-120	-135	-210	-122	-270
Max.:	180	120	135	210	132	270

Buttons: Inquire...

Checkboxes:

- ☐ Allow 'Righty-Flip' configuration for measurements in the back of the robot
- ☐ Allow any configuration
- ☒ Guard against joint 4 wrap-up
- ☐ Use alternate lightbeam

图 2-71

- **停车位置 (Park Position):** 应设置在测量体区域上部平面的上方。该位置应保证探头可方便清洗、便于从机器手臂支架上拆除。在关闭系统之前, 机器手臂将移动到此位置。

此外, 需要填写机器手臂关节角度的限制值, 该数值从机器手臂设置参数中选择。请不要修改机器手臂厂家设定值。

若想使探头能够移动到假人模型内部曲面边缘位置点, 机器手臂可能会接近关节角度限制值。DASY5 软件会自动检查机器手臂关节角度, 使机器手臂在达到这些极端位置点之后也可顺利离开。在一些测量范围较大的空气环境测量应用中, 启动该预防措施可能会排除太多测量点。在 DASY5 NEO 等级系统中, 操作员可使用管理员权限登录, 将自动检查禁用, 在 Install Robot 对话框中不选中勾选框 “Guard against joint 4 warp up” 即可。

机器手臂通常配置是 “Lefty-Above-No flip”。若要在机器手臂背面区域进行测量, 需要将机器手臂配置为 “Righty-Above-flip”。选中 Install Robot 对话框上相应的勾选框即可完成设置。当需要进行一些非常用习惯的网格点扫描时 (如在垂直平面上进行网格扫描), 可选中勾选框 “Allow any configuration”。

最后是安装假人模型。DASY 软件需要知道该模型相对于机器手臂的位置。对用于空气环境测量的虚拟假人模型, 需要指定一个参考位置, 对于实体假人模型, 需要指定三个参考点。为将相对于假人模型的测量网格点坐标转换为相对于机器手臂的坐标, 需要用操纵手柄指定参考点位置。此外, DASY5 软件可同时存储多个假人模型测量网格坐标与机器手臂坐标的转换关系, 使得操作员无须重新对机器手臂进行手柄操纵就可获得新切换假人模型参考点位置, 方便操作员在不同假人模型之间切换进行多组测量。当按下 Teach 按钮时, 将清除原有的参考点位置坐标, 并要求操作员用操纵手柄重新设置。在获得参考点位置之前, 需要完成探头激光束对准, 并使探头倾斜角保持在 180° 。在操纵手柄上会显示机器手臂控制器或 DASY5 软件提示的系统消息。按下 User 按钮可看到 DASY5 软件消息提示。假人模型与机器手臂 CAD 模拟窗口显示如图 2-72 所示。

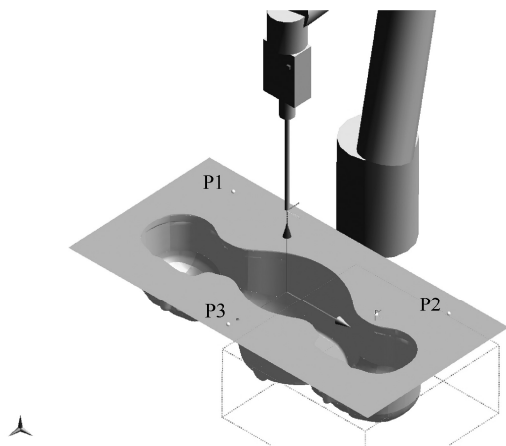


图 2-72

在设置面板假人模型上下文菜单中可选择 “Verify Phantom Reference Points...”, 对已完成参考点设置的假人模型进行参考点位置验证。如图 2-73 “Verify Phantom” 对话框所示, 选择对话框中的三个参考点之一, 并按下 Verify 按钮, 机器手臂将把探头头部定位在参考点位

置上方 10mm 处。即可验证参考点实际位置与软件中设置的位置是否一致。

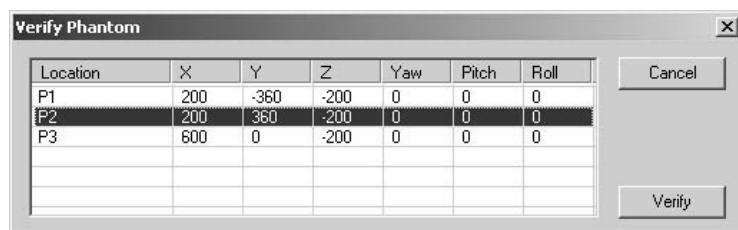


图 2-73

当某一假人模型在测量任务中使用完毕后，可卸载已安装并设置完成参考点位置的假人模型组件条目。打开假人模型上下文菜单，将给出已完成参考点位置设置的假人模型列表，按下卸载（Uninstall...）按钮，将卸载选中的假人模型。

2.6.10 原有设置的解锁

在测试文档中设置的测量任务作业完成后，其组件不再能修改，设置已被锁定。当出现设置参数需要修改的情况，例如组织模拟液参数需要更新，DUT 的方向也可能需要更改。在这种情况下，操作员以管理员权限登录，从路径 File—选择 Unlock Setup 选项可解锁原有设置。设置解锁之后测试文档无法重新开展测量任务，只有当按照路径 File—选择 Relock Setup 选项重新锁定已修改完毕的设置之后，才能重新布置测量任务。

第 3 章 比吸收率测量系统（SARA-C）

简介和应用

3.1 概述

本章介绍英国 INDEX SAR 公司的 SARA-C 研制的 SAR 测试系统,包括硬件组件及软件程序功能的介绍。

SARA-C SAR 测试系统是基于笛卡儿 4 向坐标轴机器人 (3 个轴向加旋转), 提供了一个紧凑和灵活的近场测量平台测量, 如图 3-1 所示。

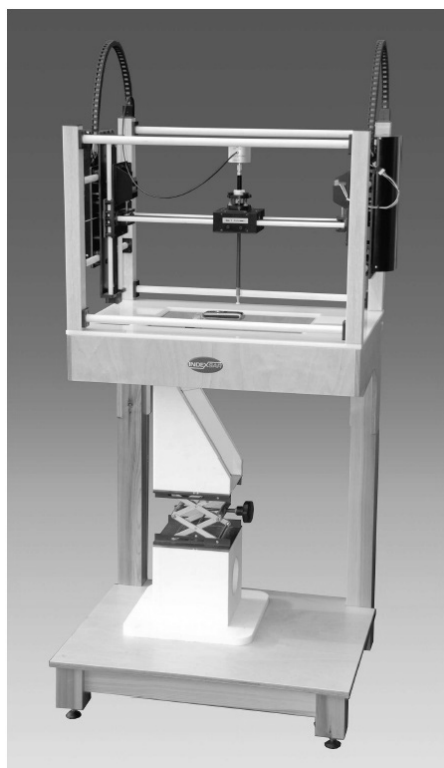


图 3-1

3.2 硬件安装

3.2.1 硬件组成

- (1) 带两个支撑腿的木桌。
- (2) 4 轴机器人主体（宽 72cm，横幅 50cm，高 48cm），如图 3-2 所示。

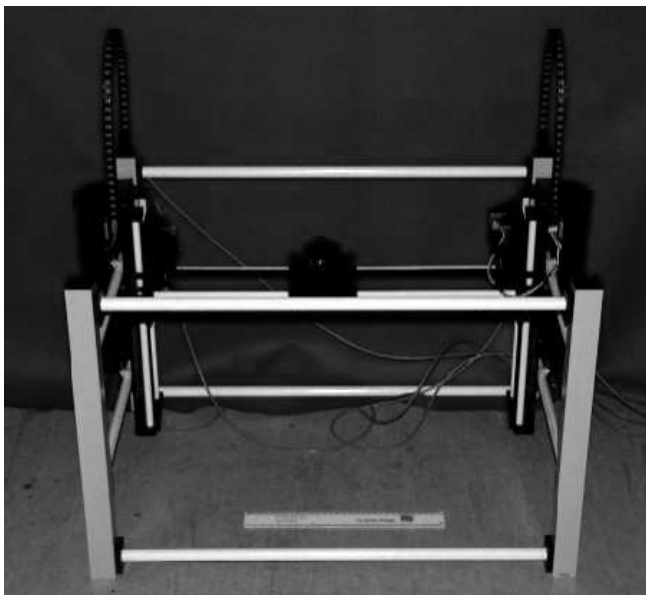


图 3-2

- (3) 白色的桌面面板（宽 72cm，横幅 50cm，高 1cm），如图 3-3 所示。

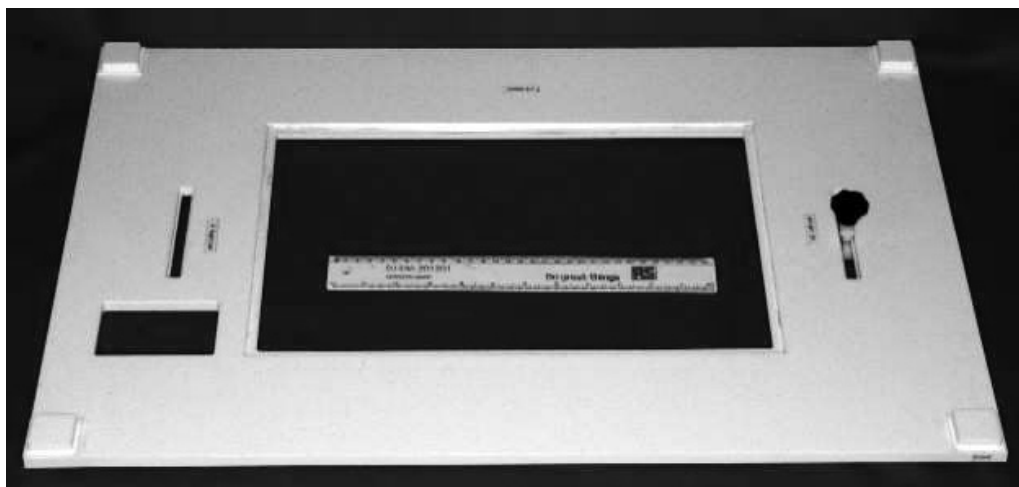


图 3-3

- (4) 坐标轴延伸支架（宽 72cm，横幅 50cm，高 20cm），如图 3-4 所示。



图 3-4

(5) 主机器人控制盒，外加可选辅助控制器。

3.2.2 安装步骤

(1) 把木桌放在硬水平地板上，如图 3-5 所示。

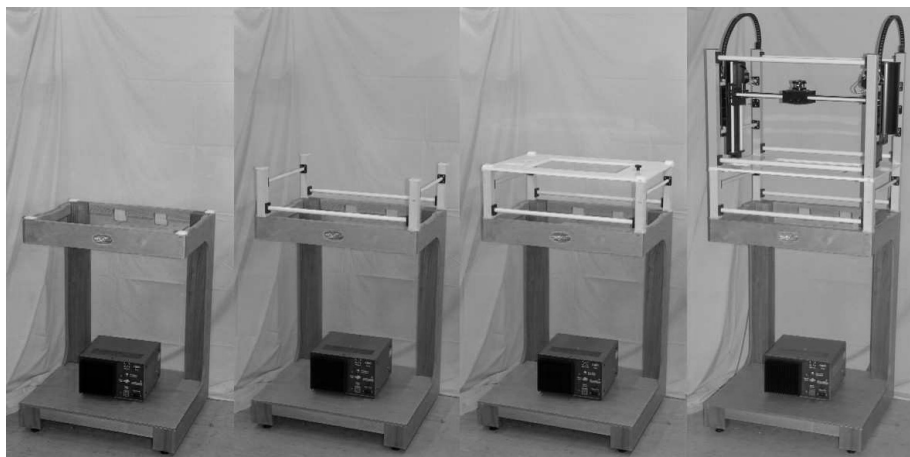


图 3-5

(2) 必须调整木桌腿以使桌子水平。稳定性是非常重要的相对于水平而言。

(3) 把木桌延长腿放在木桌上，确认标识“前”的方向和桌子面对齐。然后把腿放在木桌上。

(4) 把白色桌面面板放在延长腿的上部。

(5) 最后，把机器人主体放在白色桌面上并对齐。

3.2.3 连接线缆和控制器

线缆连接框图如图 3-6 所示。

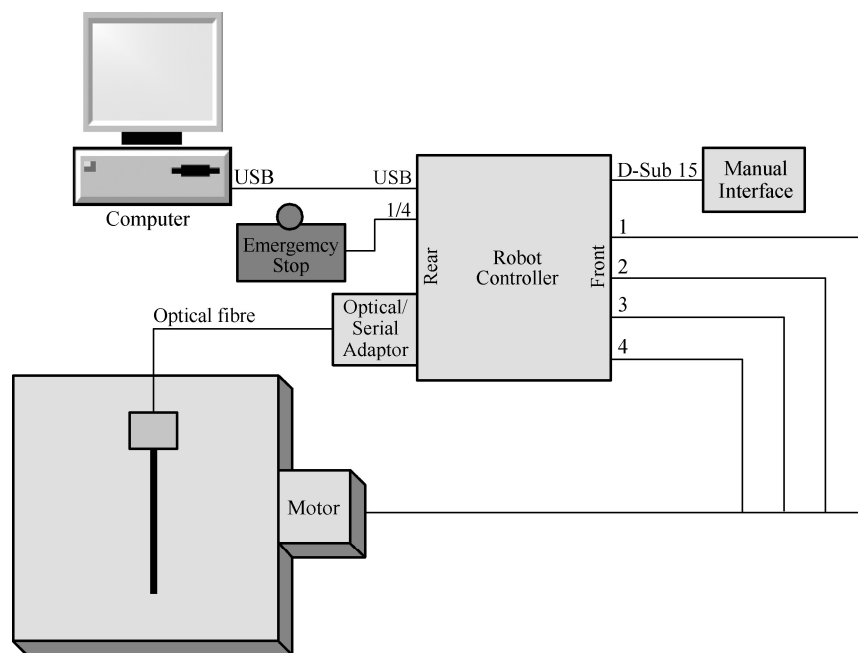


图 3-6

3.2.3.1 线缆连接

按如图 3-7 所示数字指示连接线缆。

- (1) 主线缆。
- (2) 连接 PC 的 USB 线。
- (3) 紧急停止开关插槽。
- (4) 光纤串口转换器。
- (5) 探头线束。
- (6) 辅助控制器。



图 3-7

3.2.3.2 控制器线缆连接

按如图 3-8 所示数字指示连接控制器线缆。

- (1) 连接器 1 号，机器人电机（双线）。

- (2) 连接器 2 号，机器人电机（双线）。
- (3) 连接器 3 号，机器人电机（单线）。
- (4) 连接器 4 号，机器人电机（单线）。
- (5) 与手动控制器相连的 15 针 D 连接器。



图 3-8

3.3 软件安装及要求

SARA-C 软件安装对微型计算机的要求是要至少有一个 USB 接口，推荐操作系统是 Windows XP，并且 Microsoft Word 和 Excel 要事先安装完毕。Windows 系统本地设定语言为英文。

安装 SARA-C 软件

- (1) 以系统管理员登录，或者登录用户具有管理员权限。
- (2) 插入光盘到光盘驱动器。
- (3) 在文件管理器里浏览光盘。
- (4) 双击可执行文件 SARA-C_v6p05p11_Setup.exe，然后继续，如图 3-9 所示。

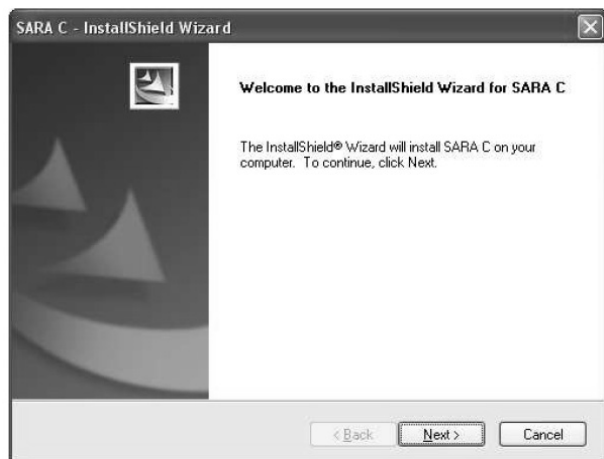


图 3-9

- (5) 默认安装目录安装或者选择想要安装的文件夹。
- (6) 出现如图 3-10 所示界面时单击 Install。

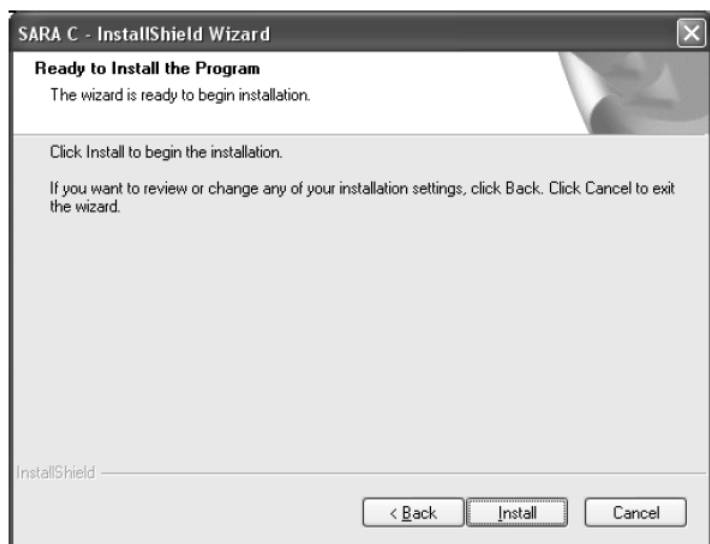


图 3-10

- (7) 直至出现如图 3-11 所示界面，安装过程完成。

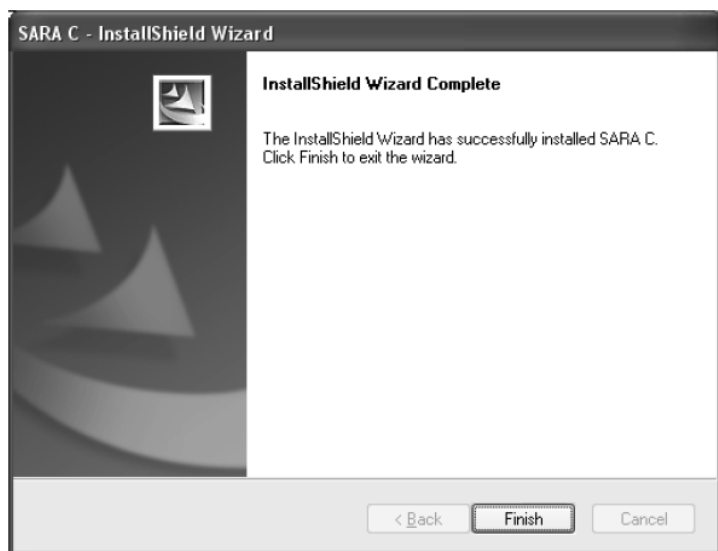


图 3-11

3.4 用垂直探头进行DUT测量的程序

3.4.1 系统安装及设置

- (1) 把上部支座放置在 SARA-C 平台上。

(2) 把人体箱体模型放落在上部支座上，往人体箱体模型里填充合适的人体模拟组织液，液面应在模型箱体最满处下 25mm 处。

(3) 需要注意的是液体温度并检查该液体的电导率和介电系数，把这些参数值填入系统里的探头参数界面。如果这些值不在所引用标准的要求的允差之内，可能是因为极端温度，这时可能需要对模拟组织液体加热或者冷却以使该参数符合要求。

(4) 把垂直探头插入到探头插槽里并用夹子固定在位，如果需要，把探头和液体地连接到一起。

(5) 放置一个快速放大器在探头上并确保连接良好。

(6) 选择合适的探头参数文件并使之有效。

(7) 用手动控制箱轻轻地将探头降低至液体里直至组织液的液面和底部之间的中部。

(8) 将被测设备固定在所要求的合适位置。

(9) 关闭所有射频信号，使探头归零。

(10) 持续降低探头至探头尖在液体底部上面的 2mm 至 4mm 之间，并在被测设备电极中部。

(11) 稍微松一下夹持齿轮以便探头能自由地上下滑动。

(12) 打开机器人控制界面，进入高级设置。

(13) 设置初始位置，这个位置便为 SARA-C 的坐标轴的 x 轴和 y 轴的零。

(14) 单击表面探测按钮；使探头移动速度不低于 0.1mm/s，所有读数皆为场强值，在此设置坐标轴的 z 轴。

(15) 时刻注意探头所得数值，当发现不对时即刻按下取消按钮。

(16) 重新绑紧探头轴承。

3.4.2 执行二维扫描

(1) 在机器人控制界面单击 2D 扫描按钮。

(2) 选择合适的 x 和 y 轴的延伸方向。

(3) 探头高度设置在机器人控制界面的 3D 栏中，为了方便用户，可以在 SAR 参数处设置系统的 x 、 y 和 z 轴的缺省范围。

(4) 单击 2D 扫描开始按钮。

(5) 在扫描完成之后，保存测试结果。如果用户扫描之中决定取消扫描，当时的结果也可以保存下来。

(6) 如果 2D 扫描能成功的定位热点，接下来的 3D 扫描会自动以此热点为中心扫描运行。

3.4.3 执行三维扫描

(1) 在 2D 扫描界面中设置好 x 、 y 轴范围。

(2) z 轴坐标设置应依照 SAR 测试建议值。

(3) 确认系统验证中的修正因子正确。

(4) 快速 SAR 测试的复选框可以勾选也可以不勾选，视需要而定。快速 SAR 检测可以用 1g/10g 测量通过，用 10g 的参数也只是仅仅降低一点点准确性。这对保证被测设备最不利

情况测试的设置有很大益处。

- (5) 单击 3D 扫描按钮。
- (6) 在运行完 3D 扫描，保存 3D 测试数据文件。
- (7) 如损耗修正因子复选框未选中，修正则不需要。
- (8) 从扫描界面读取 1g 和 10g 的平均 SAR 值。
- (9) 如果结果不是太满意，首先去检查被测设备的位置，然后是电平和持续时间。

3.5 无线设备头侧部测试SAR值程序

3.5.1 系统安装设置

- (1) 头部测试用 L 型探头和头部模型。
- (2) 把头部模型落放进木桌顶部，确保模型按照说明书方向安装。
- (3) 小心的把 L 型探头插进探头槽里，并把探头置于中央以便于探头转动。
- (4) 启动 SARA-C，确保机器人控制器和探头功放能被 SARA-C 软件正确识别。
- (5) 确保头部模型和手机形状选择正确。
- (6) 从主菜单选择 SAR Testing，如果 SAR Testing 不可用，选择 HAC Testing 然后滚动到 Swap to SAR Testing。
- (7) SAR Testing 界面出现，并出现多个栏。
- (8) 选择参考位置栏。
- (9) 选择被测设备应贴近哪个耳朵，并设置相应参数。
- (10) 往头部模型里加入足够的模拟组织液液体但低于模型上部 3cm。
- (11) 执行所需要的探头对齐准备活动，当探头尖部在参考位置后，执行后续操作。
- (12) 单击安全进入按钮，探头将进入模型及组织液体中，并且安全停止在指向被测设备方向。
- (13) 在被测设备，测试基站模拟器和其他信号源关闭的情况下，归零探头功放，与此同时把液体电导率和介电常数填入参数表。
- (14) 此时把被测设备安装在手机托里。
- (15) 有三种方式安装，可以参考具体的说明书。
- (16) 把手机托拧紧放到对应的架子里。
- (17) 为了方便，提供了两种架托，每个耳朵一个，是完全可以替换的，但是要确保是对应良好。
- (18) 确保路径损耗复选框是未选中，因为这个复选项只针对验证。

3.5.2 执行二维扫描

- (1) 选择 2D/3D SAR Scan 栏。
- (2) 如果需要，在屏幕上调整 2D 网格的形状和位置。注意无论什么时候长方形箱体模型被载入，网格都是在水平和垂直两个方向沿着长方形平面做测试。

(3) 在 2D 测试时，选择探头传感器到壳体的距离。在标准 62209-2 中，频率在 3GHz 以下的最大距离是 8mm，频率在 3GHz 以上的情况是 $8/f$ (f 的单位是 GHz) mm。

(4) 单击执行 2D 扫描按钮。

(5) 当扫描完成后，SARA-C 会分析功率热点位置。这个位置会用正方形方格和坐标轴方式标示出来。

(6) 测试完成后保存测试数据。

3.5.3 执行三维扫描

(1) 选择合适的 3D 测试设置。

(2) 单击 Do 3D Scan 按钮。如果用钢尺标定模拟体外壁位置，首先要确保它们功能正常。

(3) 数据是一个紧接一个的被探头读出，探头是在一个固定的点位移来测试 SAR 电平。

(4) 在测试的最后，1g 和 10g SAR 值被导出，并有相应的位移值。这些 SAR 值会与模拟组织液的电导率和介电常数以及测试距离相对应。

(5) 测试完成，保存 3D 测试数据。建议以**_3D 为名称的文件名保存 3D 测试数据，同样以**_2D 为名称的文件名保存 2D 测试数据。

第 4 章 比吸收率测量不确定度评估

比吸收率测量不确定度的评估参考测量标准 IEC 62209—1（2005），EN50360（2001），EN50361（2001）。

4.1 测量原理

SAR 测试是评估无线产品辐射电磁场在假人模型体内的最大功率吸收，测试频率范围一般是 30MHz 到 6GHz，被测电子产品工作在最大射频发送功率。

测量系统方框图如图 4-1 所示。

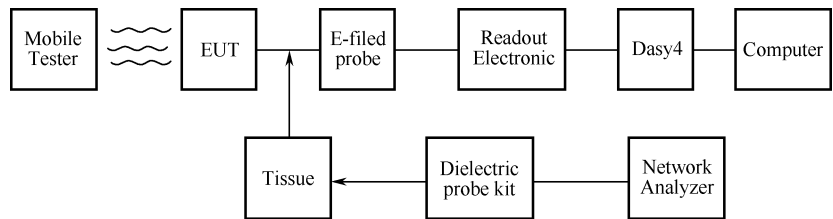


图 4-1 SAR 测试系统框图

可用两种方式计算 SAR 值：

（1）电场测量——SAR 值取决于人体组织内电场强度、电导率及质量密度，可用小尺寸电场探头测量电场强度。

（2）温度测量——组织模拟液内温度升高与吸收功率有关，用温度探头测量组织液温度，利用比热容来推算单位体积的比吸收率。

可用下式表示 SAR 值

$$SAR = \frac{d}{dt} \left(\frac{dw}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dw}{\rho \cdot dV} \right)$$

式中，dw 为吸收的电磁能量；

dm 为质量元；

dV 为体积元；

ρ 为人体组织密度；

dt 为时间元。

下面以电场场强测量为例，给出 SAR 测量不确定度的评估实例。

4.2 数学模型

$$Y=f(X_1, X_2, \cdots, X_{22})$$

4.3 标准不确定度及传播系数

合成标准不确定度：

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{22} c_i^2 u_i^2}$$

式中：

- u_c ——SAR 测量结果的合成标准不确定度；
- c_i ——传播系数；
- u_1 ——测量重复性引入的不确定度分量， $c_1=1$ ；
- u_2 ——探头校准引入的测量不确定度分量， $c_2=1$ ；
- u_3 ——探头轴向各向同性引入的测量不确定度分量， $c_3=1$ ；
- u_4 ——探头球面各向同性引入的测量不确定度分量， $c_4=0.5$ ；
- u_5 ——探头线性度引入的测量不确定度分量， $c_5=1$ ；
- u_6 ——检出限引入的测量不确定度分量， $c_6=1$ ；
- u_7 ——边界效应引入的测量不确定度分量， $c_7=1$ ；
- u_8 ——响应时间引入的测量不确定度分量， $c_8=1$ ；
- u_9 ——噪声引入的测量不确定度分量， $c_9=1$ ；
- u_{10} ——积分时间引入的测量不确定度分量， $c_{10}=1$ ；
- u_{11} ——扫描系统引入的测量不确定度分量， $c_{11}=1$ ；
- u_{12} ——人模型引入的测量不确定度分量， $c_{12}=1$ ；
- u_{13} ——探头与参考人模型的匹配引入的测量不确定度分量， $c_{13}=1$ ；
- u_{14} ——被测设备摆放位置引入的测量不确定度分量， $c_{14}=1$ ；
- u_{15} ——人体组织密度引入的测量不确定度分量， $c_{15}=1$ ；
- u_{16} ——组织模拟液电导率(偏离目标值)的测量不确定度分量， $c_{16}=0.5$ ；
- u_{17} ——组织模拟液电导率(测量误差)引入的测量不确定度分量， $c_{17}=1$ ；
- u_{18} ——组织模拟液相对介电常数(偏离目标值)引入的测量不确定度分量， $c_{18}=1$ ；
- u_{19} ——组织模拟液相对介电常数(测量误差)的测量不确定度分量， $c_{19}=0.5$ ；
- u_{20} ——被测样品输出功率、探头、温度和湿度漂移引入的测量不确定度分量， $c_{20}=1$ ；
- u_{21} ——环境条件引入的测量不确定度分量， $c_{21}=1$ ；
- u_{22} ——SAR 值外推和插值引入的测量不确定度分量， $c_{22}=1$ 。

4.4 标准不确定度分析与评估

测量不确定度的主要来源包括测量重复性、测量系统、机械制约、物理参数和后处理等，下面对已知的 22 项不确定度来源逐一进行评估计算。

(1) 测量重复性引入的测量不确定度分量 u_1 (采用 A 类评定方法评定)。

在相同测量程序、相同测试者、相同测量设备及被测物、相同位置条件下，在短时间内重复测量，以满足测量重复性要求。重复 10 次测量，得到 SAR (10g): 0.704、0.714、0.703、0.704、0.710、0.712、0.721、0.713、0.719、0.723, $n=10$ 。

$$\text{平均值} \quad \bar{q} = \frac{\sum_{i=1}^{10} q_i}{10} = 0.7123$$

$$\text{标准差百分比} \quad s(q_i)\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (q_i - \bar{q})^2}{10-1}}}{\bar{q}} = 1.0\%$$

相对标准不确定度

$$u(x_i) = \frac{s(q_i)\%}{\sqrt{10}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (q_i - \bar{q})^2}{10-1}}}{\bar{q}} = 0.3\%$$

即本测量系统中 $u_1=0.3\%$ ，自由度 $v_1=n-1=9$ 。

(2) 探头校准引入的测量不确定度 u_2 (采用 B 类评定方法评定)。

原厂校准探头的测量不确定度 a_2 为 7%，包含因子 $k_2=2$ ，服从正态分布，相对标准不确定度分量 u_2 为：

$$u_2=7\%/2=3.5\%$$

其等效自由度 $v_2=\infty$ 。

(3) 探头轴向各向同性引入的相对标准不确定度分量 (采用 B 类评定方法评定)。

探头沿着其主轴转动，在不同角度测量电场场强，误差为 0.2dB，相当于 4.7% (因为 $(10^{0.2/10}-1) \times 100\% = 4.7\%$)。

测量不确定度分量 a_3 为 4.7%，服从矩形分布，包含因子 $k_3=\sqrt{3}$ ，相对标准不确定度分量为 $u_3=4.7\%/\sqrt{3}=2.7\%$ 。

估计 a_3 的相对不确定度为 10%，其等效自由度

$$v_3=(1/2)(10/100)^2=50。$$

(4) 探头球面各向同性引入的相对标准不确定度分量 (采用 B 类评定方法评定)。

探头末端以不同的俯仰角和方位角转动，在不同角度测量电场场强，误差为 9.4%。

不确定度分量 a_4 为 9.4%，服从矩形分布，包含因子 $k_4=\sqrt{3}$ ，相对标准不确定度 u_4 为

$$u_4=9.4\%/\sqrt{3}=5.4\%$$

在正常使用状态下，探头朝向与铅垂线夹角在 $\pm 30^\circ$ 内，传递系数 $c_4=0.5$ 。

估计 a_4 的相对不确定度也为 10%，其等效自由度

$$v_4 = (1/2)(10/100)^2 = 50。$$

(5) 探头线性度引入的测量不确定度分量 (采用 B 类评定方法评定)。

探头对应不同输出电压给测量电场强度引入的不确定度为 0.2dB，相当于 4.7%。

不确定度分量 a_5 为 4.7%，服从矩形分布，包含因子 $k_5 = \sqrt{3}$ ，相对标准不确定度为

$$u_5 = (4.7\% / \sqrt{3}) = 2.7\%$$

估计 a_5 的相对不确定度也为 10%，其等效自由度

$$v_5 = (1/2)(10/100)^2 = 50。$$

(6) 检出限引入的测量不确定度分量 (采用 B 类评定方法评定)。

参考原厂技术文件，最大误差 a_6 为 1%，服从矩形分布，包含因子 $k_6 = \sqrt{3}$ ，相对标准不确定度为： $u_6 = 1\% / \sqrt{3} = 0.6\%$

估计 a_6 的相对不确定度也为 10%，其等效自由度

$$v_6 = (1/2)(10/100)^2 = 50$$

(7) 边界效应引入的测量不确定度分量 (采用 B 类评定方法评定)。

探头在两种不同媒质分界面附近测量场强，背景媒质不连续性引入的测量误差：

$$\text{Error SAR [\%]} = [u_{be}] \frac{d_{be} + d_{step}}{s_d / 2} = 0.086 \frac{4.2 + 5}{14 / 2} = 11\%$$

其中， u_{be} 为以%表示的 d_{be} 处 SAR 边界效应引入的测量误差；

d_{be} 为分界面到最近测量点(用于立方平均处理)之间的距离；

d_{step} 为第一、第二测量点间的步进距离；

s_d 为最小趋肤深度。

测量误差 a_7 为 11%，服从矩形分布，包含因子 $k_7 = \sqrt{3}$ ，相对标准不确定度为

$$u_7 = 11\% / \sqrt{3} = 6.4\%$$

估计 a_7 的相对不确定度为 15%，其等效自由度

$$v_7 = (1/2)(15/100)^2 = 22。$$

(8) 响应时间引入的测量不确定度分量 (采用 B 类评定方法评定)。

响应时间是当测量设备开/关电源后，测量响应达到终值 90%所需的时间。在读取场强测量值之前，若探头处于稳定状态的时间大于两倍的响应时间，则由于响应时间所引起的测量不确定度可忽略不计。SAR 测量系统的响应时间所引起的不确定度可以忽略不计。

$$u_8 \approx 0 \quad \text{其等效自由度 } v_8 = \infty。$$

(9) 噪声引入的测量不确定度分量 (采用 B 类评定方法评定)。

即使被测的无线设备没有发送射频信号，测量系统也能检测到微弱背景噪声。射频噪声、低频电气噪声 (例如照明系统、SAR 测量系统中的扫描系统、实验室电源的接地等)、静电影响 (例如探头的移动、人的走动等) 和其他影响 (如防止探头损坏的光检测系统、温度等) 共同构成了噪声源。此项评估测试需要定期进行 (每两个月进行一次) 关闭被测设备，通过三次不同的简单扫描可确定噪声电平。所评估的任何测量点的 SAR 值不应超过 0.02W/kg。在此约束条件下，噪声所引起的不确定度可以忽略。

$$u_9 \approx 0 \quad \text{其等效自由度 } v_9 = \infty。$$

(10) 积分时间引入的测量不确定度分量 (采用 B 类评定方法评定)。

积分时间会引入额外的误差。这种不确定度取决于射频信号特征, 需要在 SAR 测量前进行评估。被测样品发送非连续波信号引入的不确定度一般可以控制在 5% 以内。

不确定度分量 a_{10} 为 5%, 服从矩形分布, 包含因子 $k_{10} = \sqrt{3}$, 相对标准不确定度为

$$u_{10} = 5\% / \sqrt{3} = 2.9\%$$

估计 a_{10} 的相对不确定度也为 10%, 其等效自由度

$$v_{10} = (1/2)(10/100)^{-2} = 50。$$

(11) 扫描系统引入的测量不确定度分量 (采用 B 类评定方法评定)。

扫描系统中主要是探头定位的准确性及重复性所引入的测量不确定度。

$$\text{Error SAR [\%]} = \frac{d_{ss}}{s_d / 2} \times 100\% = \frac{0.025}{14 / 2} \times 100\% = 0.36\%$$

其中, d_{ss} 为探头末端相对于位于扫描面的参考点的位置;

s_d 为最小趋肤深度。

测量误差 a_{11} 为 0.36%, 服从矩形分布, 包含因子 $k_{11} = \sqrt{3}$, 相对标准不确定度为

$$u_{11} = 0.36\% / \sqrt{3} = 0.2\%$$

估计 a_{11} 的相对不确定度也为 10%, 其等效自由度

$$v_{11} = (1/2)(10/100)^{-2} = 50。$$

(12) 人体模型引入的测量不确定度分量 (采用 B 类评定方法评定)。

$$\text{Error SAR [\%]} = \frac{d_{ph}}{s_d / 2} \times 100\% = \frac{0.2}{14 / 2} \times 100\% = 2.9\%$$

其中, d_{ph} 为人体模型厚度的最大允许误差;

s_d 为最小趋肤深度。

最大误差 a_{12} 为 2.9%, 服从矩形分布, 包含因子 $k_{12} = \sqrt{3}$, 相对标准不确定度为

$$u_{12} = 2.9\% / \sqrt{3} = 1.7\%$$

估计 a_{12} 的相对不确定度也为 10%, 其等效自由度

$$v_{12} = (1/2)(10/100)^{-2} = 50。$$

(13) 探头与人体模型参考点的匹配引入的测量不确定度分量 (采用 B 类评定方法评定)。

探头与人体模型之间的定位不准会引入测量误差。

$$\text{Error SAR [\%]} = 100 \frac{d_{mis}}{s_d / 2} \% = 100 \frac{0.2}{14 / 2} \% = 2.9\%$$

其中, d_{mis} 为探头与人体模型定位的最大偏差;

s_d 为最小趋肤深度。

最大测量误差 a_{13} 为 2.9%, 服从矩形分布, 包含因子 $k_{13} = \sqrt{3}$, 相对标准不确定度为

$$u_{13} = 2.9\% / \sqrt{3} = 1.7\%$$

估计 a_{13} 的相对不确定度也为 10%, 其等效自由度

$$v_{13} = (1/2)(10/100)^{-2} = 50。$$

(14) 被测设备摆放位置引入的测量不确定度分量 (采用 A 类评定方法评定)。

三个操作员分别在人体模型左侧按照两种位置 (紧贴面颊和离开面颊 15° 角) 对三只不

同手机(被测设备)测试, 每次测试皆作两次全程扫描, 共 36 次。

用实验中各手机不同的位置中最大的标准差作评估, 经实验得到标准差 SAR (10g): 0.0459、0.0224、0.0252、0.00904、0.174、0.0120, 平均值 $\bar{x}=0.0481$ 。

$$\sigma = s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{1}{6-1} \sum_{i=1}^6 (x_i - \bar{x})^2} = 0.00397$$

$$a_{14} = s(x_i) / \bar{x} = 8.3\%$$

则被测设备摆放位置引入的相对测量不确定度分量 $u_{14} = a_{14} / \sqrt{6} = 3.4\%$

该项不确定度服从 t 分布, 其自由度 $v_{14} = 5$ 。

(15) 人体组织密度引入的测量不确定度分量。

由人体组织密度造成的测量误差较小, 该项不确定度分量忽略不计。

$$u_{15} \approx 0 \quad \text{其等效自由度 } v_{15} = \infty。$$

(16) 组织模拟液电导率引入的测量不确定度分量 (采用 B 类评定方法评定)。

组织模拟液电导率最大测量误差 a_{16} 为 5%, 传播系数 c_{16} 为 0.5。

服从矩形分布, 包含因子 $k_{16} = \sqrt{3}$, 相对标准不确定度为

$$u_{16} = 5\% / \sqrt{3} = 2.9\%$$

估计 a_{16} 的相对不确定度也为 10%, 其等效自由度

$$v_{16} = (1/2)(10/100)^{-2} = 50。$$

(17) 组织模拟液电导率测量误差引入的测量不确定度分量 (采用 B 类评定方法评定)。

对于四种组织模拟液 (900MHz-身体, 1800MHz-头部, 1900MHz-身体, 2450MHz-身体), 同一操作员使用同一仪器和测试软件在相同的环境下分别测量其电导率。 a_{17} 取最大测量误差 0.63%。

服从矩形分布, 包含因子 $k_{17} = \sqrt{3}$, 相对标准不确定度为

$$u_{17} = 0.63\% / \sqrt{3} = 0.36\%$$

估计 a_{17} 的相对不确定度也为 10%, 其等效自由度

$$v_{17} = (1/2)(10/100)^{-2} = 50。$$

(18) 组织模拟液相对介电常数偏离目标值引入的测量不确定度分量 (采用 B 类评定方法评定)。

对于四种组织模拟液 (900MHz-身体, 1800MHz-头部, 1900MHz-身体, 2450MHz-身体), 同一操作员使用同一仪器和测试软件在相同的环境下分别测量其相对介电常数。 a_{18} 取最大测量误差 0.46%

服从矩形分布, 包含因子 $k_{18} = \sqrt{3}$, 相对标准不确定度为

$$u_{18} = 0.46\% / \sqrt{3} = 0.27\%$$

估计 a_{18} 的相对不确定度也为 10%, 其等效自由度

$$v_{18} = (1/2)(10/100)^{-2} = 50。$$

(19) 组织模拟液相对介电常数测量误差引入的测量不确定度分量 (采用 B 类评定方法评定)。

组织模拟液相对介电常数测量误差 a_{19} 为 5%, 传播系数 c_{19} 为 0.5。

服从矩形分布, 包含因子 $k_{19} = \sqrt{3}$, 相对标准不确定度为

$$u_{19}=5\%/\sqrt{3}=2.9\%$$

估计 a_{19} 的相对不确定度也为 10%，其等效自由度

$$v_{19}=(1/2)(10/100)^{-2}=50。$$

(20) 被测样品输出功率、探头、温度和湿度的漂移引入的测量不确定度分量（采用 B 类评定方法评定）。

一般由漂移导致的测量误差 a_{20} 不超出 $\pm 5\%$ 。

服从矩形分布，包含因子 $k_{20}=\sqrt{3}$ ，相对标准不确定度为

$$u_{20}=5\%/\sqrt{3}=2.9\%$$

估计 a_{20} 的相对不确定度也为 10%，其等效自由度

$$v_{20}=(1/2)(10/100)^{-2}=50。$$

(21) 环境影响引入的测量不确定度分量（采用 B 类评定方法评定）。

实验室电波反射、人体模型与被测样品夹具介电特性、电磁场背景噪声电平等环境因素造成对 SAR 值测量的微扰，最大偏差 a_{21} 不高于 3%

服从矩形分布，包含因子 $k_{21}=\sqrt{3}$ ，相对标准不确定度为

$$u_{21}=3\%/\sqrt{3}=1.7\%$$

估计 a_{21} 的相对不确定度也为 10%，其等效自由度

$$v_{21}=(1/2)(10/100)^{-2}=50。$$

(22) 外推和插值算法引入的测量不确定度分量（采用 B 类评定方法评定）。

计算机软件利用外推法及积分法处理的计算结果值所产生的不确定度 a_{22} 为 3.9%。

服从矩形分布，包含因子 $k_{22}=\sqrt{3}$ ，相对标准不确定度为

$$u_{22}=3.9\%/\sqrt{3}=2.3\%$$

估计 a_{22} 的相对不确定度也为 10%，其等效自由度

$$v_{22}=(1/2)(10/100)^{-2}=50。$$

4.5 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{22} c_i^2 u_i^2} = \sqrt{1^2 \times 0.3^2 + 1^2 \times 3.5^2 + 1^2 \times 2.7^2 + 0.5^2 \times 5.4^2 + 1^2 \times 2.7^2 + 1^2 \times 0.6^2 + 1^2 \times 6.4^2 + 0 + 0 + 1^2 \times 2.9^2 + 1^2 \times 0.2^2 + 1^2 \times 1.7^2 + 1^2 \times 1.7^2 + 1^2 \times 3.4^2 + 0 + 0.5^2 \times 2.9^2 + 1^2 \times 0.36^2 + 1^2 \times 0.27^2 + 0.5^2 \times 2.9^2 + 1^2 \times 2.9^2 + 1^2 \times 1.7^2 + 1^2 \times 2.3^2} = \sqrt{122.32} = 11.1\%。$$

4.6 合成标准不确定度的有效自由度

合成标准不确定度的有效自由度按照公式：

$$\begin{aligned} v_{\text{eff}} &= \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^{22} \frac{c_i^4 u_i^4}{v_i}} = \frac{u_c^4}{\frac{c_1^4 u_1^4}{v_1} + \frac{c_2^4 u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{c_{22}^4 u_{22}^4}{v_{22}}} \\ &= \frac{11.1^4}{\frac{1^4 \times 0.3^4}{9} + \frac{1^4 \times 3.5^4}{\infty} + \dots + \frac{1^4 \times 2.3^4}{50}} \\ &= 14961 / 110 = 136 \end{aligned}$$

4.7 测量不确定度的包含因子

设定置信概率为 95%，查 t 分布表确定包含因子 k_p

$$k_p = t_p(v_{\text{eff}}) = t_{0.95}(136) = 1.98$$

4.8 扩展不确定度的计算

相对扩展不确定度

$$u = k_p \times u_c = 1.98 \times 11.1 \% = 21.9\%$$

4.9 测量不确定度评估一览表（如表4-1所示）

表 4-1 测量不确定度评估一览表

序号	不确定度来源	评定方法	误差值 a_i (%)	概率分布	包含因子 k_i	传播系数 c_i	标准不确定度分量 u_i (%)	(等效)自由度 v_i
1	测量重复性	A	0.3			1	0.3	9
	测量系统							
2	探头校准	B	7	正态	2	1	3.5	∞
3	探头轴向各向同性	B	4.7	矩形	$\sqrt{3}$	1	2.7	50
4	探头球面各向同性	B	9.4	矩形	$\sqrt{3}$	0.5	5.4	50
5	探头线性	B	4.7	矩形	$\sqrt{3}$	1	2.7	50
6	检出限	B	1.0	矩形	$\sqrt{3}$	1	0.6	50
7	边界效应	B	11	矩形	$\sqrt{3}$	1	6.4	22
8	响应时间	B	0			1	0	∞
9	噪声	B	0			1	0	∞
10	积分时间	B	5.0	矩形	$\sqrt{3}$	1	2.9	50

续表

序号	不确定度来源	评定方法	误差值 a_i (%)	概率分布	包含因子 k_i	传播系数 c_i	标准不确定度分量 u_i (%)	(等效)自由度 ν_i
机械制约								
11	扫描系统	B	0.36	矩形	$\sqrt{3}$	1	0.2	50
12	人体模型	B	2.9	矩形	$\sqrt{3}$	1	1.7	50
13	探头与参考人体模型的匹配	B	2.9	矩形	$\sqrt{3}$	1	1.7	50
14	被测设备摆放位置	A	8.3	t		1	3.4	5
物理参数								
15	人体组织密度	B	0			1	0	∞
16	组织模拟液电导率 (偏离目标值)	B	5.0	矩形	$\sqrt{3}$	0.5	2.9	50
17	组织模拟液电导率 (测量误差)	B	0.63	矩形	1	1	0.36	50
18	组织模拟液相对介电常数 (偏离目标值)	B	0.46	矩形	$\sqrt{3}$	1	0.27	50
19	组织模拟液相对介电常数 (测量误差)	B	5.0	矩形	$\sqrt{3}$	0.5	2.9	50
20	被测样品输出功率、探头、 温度和湿度的漂移	B	5.0	矩形	$\sqrt{3}$	1	2.9	50
21	环境	B	3.0	矩形	$\sqrt{3}$	1	1.7	50
后处理								
22	SAR 值外推和插值	B	3.9	矩形	$\sqrt{3}$	1	2.3	50
合成标准不确定度 u_c		$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{22} c_i^2 u_i^2} = \sqrt{122.32} = 11.1$					11.1%	136
扩展不确定度 (95%置信水平)		$u = k_p \times u_c = 1.98 \times 11.1\% = 21.9\%$					21.9%	

第 5 章 比吸收率测量系统验证

5.1 SAR 测量系统验证的目的

检查实验室 SAR 测量系统以及 SAR 测量系统验证是证明或确认系统可按规格的要求运行，若系统和操作员出现错误可以被发现并能够纠正。SAR 测量系统的检查可每个工作日进行或每次进行 SAR 测试之前进行。SAR 测量系统的验证可每年进行一次（例如场强探头校准之后），也可在参加实验室间比对之前进行。当更换系统组件，如升级计算机软件、更换数据采集单元或使用新探头时，也需要开展 SAR 测量系统验证。

SAR 测量系统复杂，组件多样，参数设置众多，只有当各个组件功能正常、各个参数设置正确，才能够得到合理真实的 SAR 值测量结果。当出现有设置不正确的软硬件参数或者电气电子组件有温漂、零漂情况时，在测量实验中将会得出错误的 SAR 值，它们并不容易被发现，因为 SAR 分布与真实正确的结果很相似。因而实验室需要置办检查及验证 SAR 测量系统的装置，建立工作流程和作业指导。在简单典型 SAR 测试环境中对特性已知射频源进行场强测量，可作为 SAR 系统检查或验证的实验方案。典型实验环境是用双半头 SAM 假人平坦段或单个平坦假人模型，典型的已知射频源是偶极子天线。该实验设置的测量结果对偶极子天线夹具定位不确定度等外部影响因素不敏感，但对探头、软件参数、组织模拟液介电特性等这类可能会被错误设置或容易随时间变化的参数敏感。

SAR 测量系统验证是整体功能层面，不能用来代替各个组件的校准。系统验证得到的 SAR 值准确度不足以达到组件校准的准确度，不宜当作组件校准的数据依据。SAR 测量系统验证布置简单，若不计入电磁场开放域的影响因素（如实验室环境反射），有时可以通过计算的方法相当准确地得出场强分布。另外，在使用平坦假人模型情况下，可用温度场探头法和电场探头法相互校准。

事实上，SAR 测量系统在交付前都进行测量系统误差估计，使用了各种典型测试用例，包括组织模拟液中球面各项同性、测量线性度、温度变化因素等。系统验证实验和实际测量不同，它不利用测量手机射频产生的任意电磁场分布来检验系统性能。系统验证实验能够指示出各种由于参数设置错误、组件失效、温漂、零漂等导致测量结果超出系统不确定度的情形。

5.2 SAR测量系统验证流程

验证流程包括三个主要步骤：准备工作、系统检查、系统验证。

在准备工作阶段，先完成组织模拟液相对介电常数和电导率测量，结果录入到 SAR 测量软件。当系统检查所用的组织模拟液介电参数测量值偏离标准要求目标值时，SAR 值会与期望值不同，可调整组织模拟液成分。组织模拟液介电参数也受温度影响，蔗糖水溶液型组织模拟液温度降低 1℃时相对介电常数减小约 0.5%，电导率增大约 1%。参考源偶极子天线放置在假人模型平坦区段下方，应当使用相应厚度有机玻璃圆柱垫片使间隔距离保持准确。圆柱垫片应当紧贴模型底部外壳上的红十字标记，偶极子天线朝向沿着平坦区段长度方向。手机夹具可以照旧停靠在假人模型底座固定螺栓位置上，但应水平转动一定角度，远离偶极子天线。通过输入功率测量保证偶极子天线 SMA 接头馈入功率的准确性，实验中应准确记录实际馈送功率大小。馈入功率电平等级一般处在 20mW~2W，不同结果比定时可将输入功率折算至相同数值。

在系统检查阶段，应先确认 SAR 测量软件中是否已正确设置双半头 SAM 假人模型或平坦假人模型，接下来设置场强探头、组织模拟液等其他组件软件参数。SAR 测量软件提供的作业任务有参考功率测量和功率漂移测量，用来考查组织模拟液中某个固定测量点在测量网格点扫描一遍之前和之后的场强值漂移。该漂移主要是所用射频信号源功放输出功率漂移引起的。若漂移量值超过 $\pm 0.1\text{dB}$ ，系统检查实验应当重做。有的功放在预热过程有较大的温漂，功放性能稳定时漂移量值在 $\pm 0.02\text{dB}$ 之内。选定与假人平坦区段底面平行的水平面，在矩形区域中扫描场强值，定位得出 SAR 值峰值的大致位置。该过程可使用步长较大的网格。由于在偶极子天线上方组织模拟液中的场强分布呈现中心对称，因此对 SAR 值峰值的定位非常可靠。之后区域扫描中在已确定 SAR 值峰值周围体积内进行精细扫描，得出 SAR 值峰值。将偶极子天线输入功率归一化到 1W，得出的 SAR 值（1g）峰值或 SAR 值（10g）峰值即可用于比对。

在系统验证阶段，除了用到在系统检查阶段进行的 SAR 值测量结果，还需要测量偶极子天线馈电点正上方沿垂直方向上的 SAR 值分布（可称为 z 轴扫描），可对若干测量位置点进行插值。另外探头轴向转动不同角度，评估轴向各项同性。

5.3 功率设置

偶极子天线馈送功率值的不确定度对最终测量结果不确定度的贡献最大。在实验室间比对活动中，也构成了不同实验室报送结果之间的偏离。测量偶极子天线输入功率可使用射频功率计，可参考射频功率计的用户手册来评估天线输入功率值的测量不确定度。射频功率计测量不确定度评定表给出的是典型电路情形下的均值，在通常偶极子天线辐射源电路布置情况下信号源、天线的匹配等也会增加馈送功率测量不确定度。各个被测量均是功率，注意下文 5.4 节中，1%的相对变动对应是 0.04dB。如图 5-1 所示是 SAR 系统检查被测偶极子天线电路原理图，实验布置是射频功率测量推荐方式，提高了射频功率读数准确度。

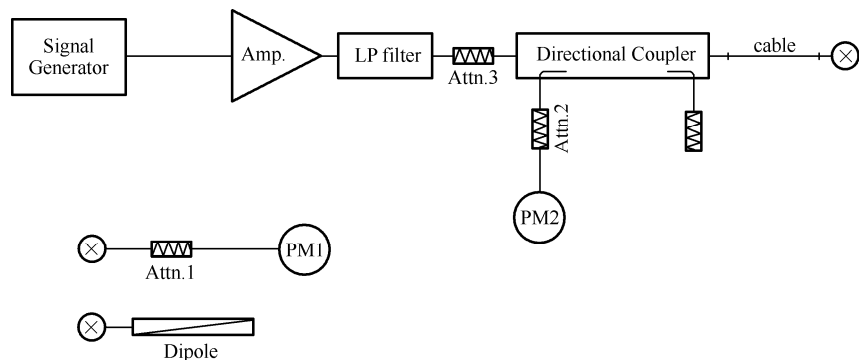


图 5-1

射频功率计 PM1（连同其输入端的衰减器 Attn.1）连接在同轴线偶极子天线 SMA 接头上，用来读出前向功率大小，该 SMA 接头在验证实验中连接偶极子天线。调节信号源输出功率，使得射频功率计 PM1 的读数稳定在前向功率目标值。射频功率计 PM2 用来读出 SMA 接头相应反射功率大小。将偶极子天线连接到 SMA 接头，调节信号源输出功率直至射频功率计 PM2 重回原有读数（ $\pm 0.01\text{dB}$ ）。信号源调节步长无法降至 0.01dB 以下时，应记录 PM2 前后读数差别，修正测量 SAR 值。各个组件规格要求如下：

（1）信号源和功放在预热之后要通过稳定性考核。馈送至偶极子天线的前向功率应大于 10mW ，以避免测量噪声显著影响。当信号源输出 15dBm 以上功率时可不使用功放。功放工作实际功率值不应远低于其最大可输出功率值。信号源输出至功放应接入衰减器，以免功放输入端超出最大允许值。

（2）功放输出接低通滤波器是为了减少功放的输出谐波和输出噪声影响。大多数功放通常在典型功率下不需要输出接低通滤波器。

（3）功放输出与射频功率计之间接入衰减器可改善源端的匹配，提高功率计读数准确度。使用衰减器可让功放工作功率更合理，输出功率大小稳定、噪声低。原理设置未用定向耦合器时，衰减大小至少应达到 10dB 。

（4）推荐使用 20dB 以上隔离度的定向耦合器，用来监测信号源提供的前向功率，调节功率保持恒定。偶极子天线、射频功率计输入匹配良好，选用普通规格定向耦合器即可（反射较大的负载场合为减少额外的误差要求使用隔离度高、输出端口良好匹配的定向耦合器）。

（5）要求射频功率计 PM2 低零漂、功率分辨率达到 0.01dBm 。PM2 不要求经过校准。

（6）要求定向耦合器和偶极子天线之间使用衰减很低同轴线缆。线缆在挪动变形时转移保持不变。

（7）要求射频功率计 PM1 输入端连同衰减器 Attn.1 经过校准。衰减器应具备至少 10dB 衰减以改善功率测量准确度（高档射频功率计输入端有内置衰减器）。应事先测量衰减器实际衰减值，其与额定值可能存在 $\pm 0.2\text{dB}$ 偏差。

（8）射频功率计 PM1 在实际测量和前向功率监测中应使用同样的功率量程，避免射频功率计 PM2 出现线性度和量程切换误差。若要求在不同功率等级下进行 SAR 测量系统检查，每种功率等级下都应应将 PM1 和 PM2 设置到相同功率量程上。

（9）偶极子天线直接与 SMA 接头同轴线缆相连，该 SMA 接头应直接连到射频功率计 PM1 输入端，若不是 SMA 接头，应使用规格好的同轴转换接头，连接在衰减器输入端，并

同衰减器作为一体进行校准。

(10) 在 SAR 测量系统检查阶段, 应避免在较高功率等级工作时测量结果有较明显的功率漂移。功率设定到目标值后保持一段时间, 即 SAR 值测量前的预热过程不可少。

5.4 实验室电波环境

实验室中电磁场近场条件下, 功率吸收主要是近场磁场感应引起的, 相对而言, 对实验室的反射场的功率吸收可被忽略。另一方面, 电偶极子的磁场取决于电流大小, 即受其输入阻抗决定。电偶极子由于距离很近地贴靠在假人模型平坦底部, 输入阻抗受到组织模拟液功率吸收的影响。但按照进行 SAR 测量系统验证的实验准确度要求, 实验室的反射也会轻微地影响输入阻抗实部的大小。馈送同样前向功率条件下, 输入阻抗实部大小增加 1% 对应着比吸收率大约减小 1%。

实验室反射可能造成的影响应当在 SAR 测量系统在实验室初装时进行调查, 事实上使用系统验证用的上述实验布置即可, 由于被测 SAR 值对实验室反射较敏感。用一台手机做被测样品也可以开展同样实验, 但大多数手机天线输入阻抗对于贴近假人模型不太敏感。为检查实验室反射效应是否有影响, 可设置场强探头在偶极子天线馈电点正上方以毫米量级步长进行测量。在实验室内可能的反射体 (如偶极子天线正下方的地面、机器手臂金属基座) 附近放置吸波材料可立刻检查其反射的影响。反射波幅度相比天线辐射场幅度较小, 吸波材料选用 10dB 衰减即可, 材料可选用铁氧体或吸波毯, 但应远离偶极子天线, 否则会与天线周围感应近场相互作用。

除了测量 SAR 值, 也可用网络分析仪监测实验室反射是否引起天线输入阻抗发生小幅变化。网络分析仪的测量参考面应校准到 SMA 接头处。另外要设置电气时延大小, 以便与偶极子天线校准证书中的回波损耗特性相互比对。

如果布置吸波材料对测量结果有明显影响, 则在 SAR 测量实验或系统验证实验中都应当摆放吸波材料。相应地, 偶极子天线的校准数据也应当是在低反射环境中测得的。

5.5 补充的检查

SAR 测量系统验证实验的检查效果可照顾到整个测量系统各个组件功能和性能。与无线产品 SAR 测试相比, 无法检查实际 SAR 测量实验被测样品信号参数、摆放位置等参数设置是否正确。对于 SAR 测试实验室之间结果比对和系统重复性检查, 各个实验室可测量同一台参考样品。可选择一台输出功率满足稳定性考核要求的手机, 也可用自身键盘设置输出功率的测试用手机。不同样品之间 SAR 值可能存在明显差别, 将此同一台样品手机在各个实验室之间传递, 实现结果比对。

SAR 测量系统的计算机应用程序有时可提供新的方式检查系统或组件参数性能。

(1) 为检查场强读数噪声电平或场强探头二极管检波动态范围, SAR 测试软件可设置各种功率等级。

(2) 向偶极子天线馈送高峰值电平的脉冲信号, 可检查系统的检波二极管压缩补偿性能。此时, SAR 测试软件中通信系统如波峰因子等参数须设置准确, 否则 SAR 值与平均输入功

率值之间会有出入。

因此，补充的检查可用于定位某个组件失效或某个参数被错误设置。

5.6 DASY系列SAR测量系统验证

系统验证过程的检验对象包括参考 SAR 值、场强探头性能、数据采集单元以及软件的设置。实验设置采用平坦假人和偶极子天线。被验证 SAR 测量系统使用的场强探头在之前须已进行校准。按照国际 SAR 测量标准，在下列情况下要进行 SAR 系统验证。

- 年检；
- 新安装的 SAR 测量系统，在第一次使用之前；
- 主要组件（如：更换场强探头、数据采集单元）更换；
- 软件更新。

5.6.1 平坦假人

要求平坦假人底部壳体厚度均匀（容差 $\leq \pm 0.2\text{mm}$ ），用于频率低于 800MHz 时，要求厚度不超过 6.5mm；用于频率 800MHz~3GHz 时，要求典型厚度是 2mm。在验证实验中，平坦假人盛装足量头部组织模拟液。平坦假人模型壳体材料应损耗低，在频率低于 700MHz 时可选用 ELI；在 800MHz~6GHz 可选用有机纤维玻璃。壳体材料应符合 SAR 测量标准要求，相对介电常数小于 5.0，损耗正切小于 0.05。

5.6.2 偶极子天线参考源

系统验证的指定测试频率作为中心频率点，选择相应阻抗带宽的偶极子天线。偶极子天线加载平坦假人之后，其回波损耗在中心频率点应大于 20dB。在偶极子天线端部安装分立调节元件，可细调偶极子天线输入阻抗特性。偶极子天线轴向与平坦假人底面外壳的长轴重合，馈电点在底面外壳中心点正下方，两者之间使用标准厚度塑料垫片确保达到正确间距，选用低介电常数和低损耗的塑料垫片。在频率范围 300MHz~1000MHz，垫片厚度是 $15\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ ；在频率范围 1000MHz~6000MHz，垫片厚度 $10\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ 。系统验证实验使用的偶极子天线是用标准的半刚性同轴线缆制作，该偶极子天线在直流时是短路，馈电线缆的内导体直接连接至偶极子天线臂。偶极子天线机械尺寸设计是为了满足在验证实验条件下保持阻抗匹配。

5.6.3 组织模拟液

系统验证用到的头部组织模拟液介电参数目标值如表 5-1 所示。

表 5-1

频率 (MHz)	相对介电常数 (ϵ_r)	电导率 (σ)	频率 (MHz)	相对介电常数 (ϵ_r)	电导率 (σ)
300	45.3	0.87	2100	39.8	1.49
450	43.5	0.87	2300	39.5	1.67
750	41.9	0.89	2450	39.2	1.80

续表

频率 (MHz)	相对介电常数 (ϵ_r)	电导率 (σ)	频率 (MHz)	相对介电常数 (ϵ_r)	电导率 (σ)
835	41.5	0.90	2600	39.0	1.96
850	41.5	0.92	3000	38.5	2.40
900	41.5	0.97	3500	37.9	2.91
1450	40.5	1.20	3700	37.7	3.12
1640	40.2	1.31	5000	36.2	4.45
1800	40.0	1.40	5200	36.0	4.66
1900	40.0	1.40	5500	35.6	4.96
2000	40.0	1.40	5800	35.3	5.27

在频率范围 300MHz~3000MHz, 介电参数采用当前广泛使用的 SAR 测量标准 (IEEE1528, IEC 62209—1, OET 65 Supplement C) 给出的目标值。用频率点 3.0GHz 和 5.8GHz 的目标值线性插值给出了 3000MHz~5800MHz 频段各个目标值。头部组织模拟液介电参数应在验证实验之前测量, 测量值相对于目标值的偏离应在 $\pm 5\%$ 以内。

5.6.4 环境要求

实验室安装空调和加湿器, 保证温湿度要求。安装电波吸收材料, 定期测量被测样品无线发送在关闭之后的背景射频噪声功率。系统验证实验环境可采用如下规格:

- 背景射频噪声: $<12\mu\text{W/kg}$
- 环境温度: $22\pm 1^\circ\text{C}$
- 环境相对湿度: 20%~50%
- 组织模拟液温度 (实验前后和实验期间): $22\pm 1^\circ\text{C}$

5.6.5 验证实验的功率设置

以实验规格要求设置馈送偶极子天线 SMA 接头的前向功率大小, 原理图如图 5-2 所示。

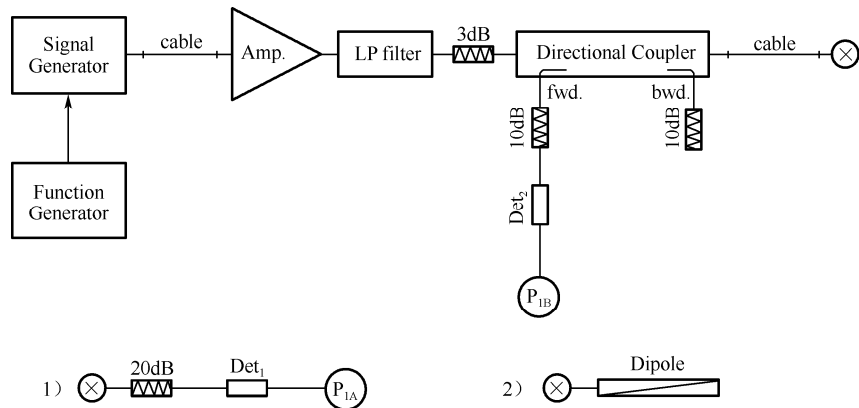


图 5-2

用射频功率计 P_{1A} 连同 20dB 衰减器测量偶极子天线接插头的前向功率。定向耦合器用于监控前向功率保持恒定, 选用隔离度大于 20dB 的定向耦合器。调节信号源输出功率, 使得 P_{1A} 读数达到前向功率目标值 250mW, 并记录射频功率计 P_{1B} 读数。射频功率计 P_{1A} 连同 20dB 衰减器在实验前应做好校准。射频功率计 P_{1B} 的功率分辨率应达到 0.01dBm, 将接插头连接偶极子天线, 调节信号源输出功率, 使射频功率计 P_{1B} 保持原有读数。低通滤波器用于抑制功放输出噪声和谐波, 3dB 衰减器用于改善阻抗匹配。

5.6.6 验证结果记录

被测无线设备 SAR 合规测试的系统验证过程包含六个任务活动。其中, 任务一是 SAR 值测量, 是系统验证必有的活动。任务二是液深 (z 轴方向) SAR 值测量。任务二和任务六 (场强探头轴各向同性) 用来简单且快速地验证场强探头、数据采集单元、计算机软件的性能。任务三 (场强探头线性度) 和任务四 (调制响应) 是附加测试, 当系统主要组件有变动时进行, 例如使用了新的场强探头、数据采集单元, 或计算机软件有更新。

任务一: SAR 值测量。进行一遍 SAR 值测量完整过程, 测量结果是 1g 平均 SAR 值或 10g 平均 SAR 值。各个频段参考偶极子天线输入功率均是 250mW, SAR 值测量结果归一化至对应于 1W 输入功率, 与各频点的参考 SAR 值比对, 或进行实验室间比对。考虑到偶极子天线与平坦假人模型实验系统 SAR 值复现的重复性, 当各个目标频点 SAR 值的标准偏差相对值均不超过 4%, 可认为被验证的 SAR 测量系统组件性能正常, 设置参数正确, 达到验证要求。

任务二: 液深 SAR 值测量。在偶极子天线馈电点正上方按手机 SAR 测试网格步长从深至浅测量不同 z 坐标的 SAR 值。从馈电点正上方水平离开 20mm, 重复前述过程, 从深至浅测量 SAR 值。外推 z 坐标至零, 得出平坦假人底部表面 SAR 值, 与瑞士 SPEAG 公司参考值比对。测试所用的实验操作是 z 方向扫描作业, 网格步长在 3GHz 频率内设置为 5.0mm, 第一个网格测量点距离假人底部表面 4.0mm。3GHz 频率以上网格步长设为 3.0mm, 第一个网格测量点距离假人底部表面 2.0mm。对测量数据用后处理功能, 外推得出假人模型底部表面馈电点位置的 SAR 值, 要求偏离在规定的百分比内。

任务三: 场强探头线性度。在不同馈送功率等级下, 重复进行任务一中的 SAR 值测量。按评估要求, 至少给出四种以上不同馈送功率等级, SAR 值测量结果均归一化至对应于 1W 输入功率。要求标准偏差相对值不超过场强探头的测量不确定度相对值。

任务四: 调制响应。偶极子天线馈送信号是占空比 0.1 重复率 10Hz 脉冲调制信号, 重复进行任务一中的 SAR 值测量。调节馈送功率, 使得脉冲调制信号产生的 SAR 值 (1g) 达到 8mW/g, 即若无脉冲调制时, SAR 值 (1g) 约对应 80mW/g。将 SAR 值测量结果归一化至对应于 1W 输入功率, 且归一化至满占空比, 与任务一 SAR 值结果比对。

任务五: 系统偏移量。可与场强探头线性度测试 (任务三) 同时进行。按最低输入功率 5mW 进行 SAR 值测量, 将测量结果归一化至对应于 1W 输入功率。与任务一 SAR 值结果比对。

任务六: 探头轴各向同性。探头中心点在馈电点正上方, 在距离假人底部外壳内表面 5mm 的网格点测量。探头绕轴转动 360° , 转动步长不超过 10° , 记录最大和最小 SAR 值, 两者差值的一半不应超过各项同性的要求, 例如 $\pm 0.2\text{dB}$ 。

第 6 章 开路同轴探头液体 介电特性测量技术

组织模拟液介电参数的量值不确定度直接影响人体暴露量比吸收率（SAR）值测量不确定度，美国 Agilent 公司和瑞士 SPEAG 公司有 85070 系列和 DAK 系列介电测量探头套件。液体介电测量技术和 SAR 值测量关联紧密，本章介绍开路同轴探头技术测量液体复介电常数的理论和实验。在直流或频率非常低的情况下，电介质材料的相对介电常数和电损耗可以独立测量；而在频率较高时，以复介电常数代表相对介电常数和电导率，描述介电特性对频率的依赖。在射频和微波频段，用波导开口端紧贴被测材料样品的平整表面，通过测量反射系数实现介质传感器功能，是测量复介电常数的常用方法之一。相对于需测量两个端口散射参数的传输-反射法，这种开口波导法也称作反射系数法，其中引起研究者极大兴趣的是开路同轴线技术，测量频段在理论上可从直流点至第一高次模截止频率，可覆盖用矩形开口波导不能测量的低于 TE_{10} 模截止频率的频段。自从 1970 年以来，开路同轴探头逐渐用于人体动物体生物组织、有机材料、电解质溶液等有耗媒质的介电特性测量。

开路同轴探头在介质测量中通常工作在低频区。在很多实例中，通过确定探头开路结构对应的集总电路模型与参数即可合理地描述反射系数与复介电常数之间的数量关系。例如，同轴线开路端的等效导纳在低频表现为容性，且电导主要来自介质损耗，辐射损耗贡献很小，可以被等效为两电容并联电路，一个电容反映同轴内导体和外导体与被测介质之间的电容作用，另一个电容反映它们与同轴填充介质之间的电容作用。该方面研究应用的代表是四川大学黄卡玛教授等开展的化学溶液介电特性测量，使用的同轴探头开路端无导体法兰，外导体内直径（同轴孔径）10mm，内导体直径 3mm，测量频率为 915MHz 和 2450MHz。两电容模型可以很好地表达低频物理机理，但无法准确描述依赖于频率的电容效应，对于测量频带宽、被测复介电常数值分布区间大（实部：10~100）的情况，同轴探头的电磁场模型是不可缺少的。上海大学微波介质材料测量课题组开展了带法兰开路同轴探头测量介质基材板复介电常数的研究，在全波模型中包含了同轴线主模及高次模式反射波，能够给出主模反射系数与复介电常数之间严格的数值关系。全波模型建模准确，但是复介电常数反演过程复杂，而且通常每个迭代步都要计算正问题，显著增加了计算量。除了分层媒质结构，对于被测介质充满半空间的情形，当同轴线高次模式反射波可忽略不计时，同轴开路端输入导纳值可表达为被测介质复波数的多项式，进而可通过求解代数方程得出复介电常数，因此反演过程简单，计算量小。本章用上述方法实现了液体复介电常数测量，应用领域包括比吸收率（SAR）测试用人体组织模拟液相对介电常数与电导率的测量和验证。由于目前广泛使用的无线通信频率

不超过 6GHz, 开路同轴探头孔径尺寸通常远小于被测模拟液的波长, 在实验中, 忽略高次模式反射波效应得出的测量结果在实际应用中是可被接受的。

6.1 开路同轴探头横电磁波模型法

带法兰开路同轴探头如图 6-1 (a) 所示。在测量实验中, 将法兰视为半径无限大的理想导电平面, 下方半空间充满被测液体, 如图 6-1 (b) 所示。

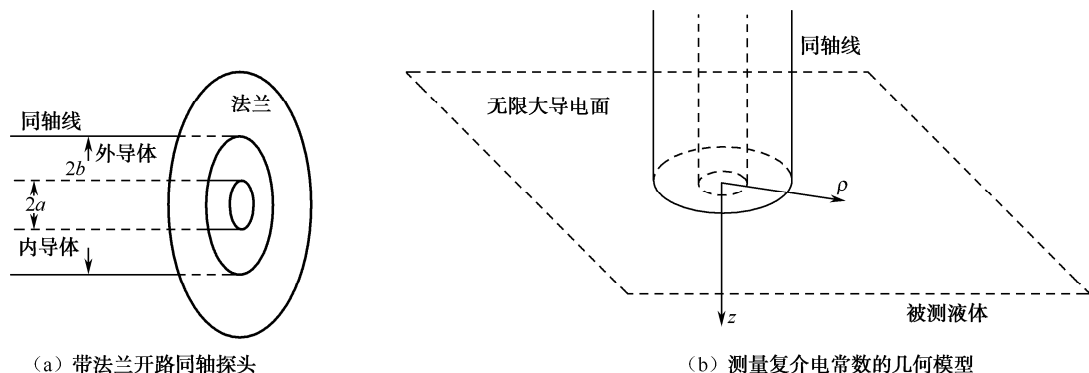


图 6-1

横电磁波模型法本质上是全波分析法中忽略了同轴线高次模反射波的简单特例。记同轴线上导体和外导体半径分别是 a 和 b , 入射的横电磁波 (TEM 波) 电压设为 V_0 。在同轴线中, 同轴开路端产生的反射波包含 TEM 主模和 $TM_{0n}(n=1,2,\dots)$ 高次模, 将主模的电压记作 $\Gamma_0 V_0$, 高次模的电压记作 $\Gamma_n V_0$, Γ_0 和 Γ_n 是相应的反射系数。在同轴开路端的圆环缝隙上, 切向电场没有方位向分量, 其径向分量可表达为

$$E_\rho(\rho) = (1 + \Gamma_0)V_0 A_0(\rho) + V_0 \sum_{n=1}^{\infty} \Gamma_n A_n(\rho) \quad (6-1)$$

式 6-1 中, TEM 主模的电场径向分布为 $A_0(\rho)$, 有 $A_0(\rho) = 1/[\rho \ln(b/a)]$, TM_{0n} 高次模的横向电场径向分布记作 $A_n(\rho)$ 。由于问题具有圆柱对称性, 缝隙上电场在被测电介质填充的半空间辐射产生的电场和磁场不随方位角变化。时谐因子取 $e^{j\omega t}$, 依据等效原理和镜像原理, 最终得到的被测电介质中的磁场只有方位向分量,

$$H_\phi(\rho, z) = j\omega \frac{\overline{\epsilon_m}}{\pi} \int_0^\pi \int_a^b \rho' E_\rho(\rho') \cdot \frac{e^{-jk_0 \sqrt{\epsilon_m} r}}{r} \cos \phi' d\rho' d\phi' \quad (6-2)$$

式 6-2 中, 场点和源点的圆柱坐标分别记作 $(\rho, 0, z)$ ($z > 0$) 和 $(\rho', \phi', 0)$, $\overline{\epsilon_m}$ 是被测液体的复介电常数, $\overline{\epsilon_m} = \epsilon_r - j\sigma/(\omega\epsilon_0)$, ϵ_r 和 σ 分别是相对介电常数和电导率, 真空中的波数 $k_0 = \omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$, r 是场点至源点的距离 $\sqrt{\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho'\cos\phi' + z^2}$ 。

同轴线中的磁场也只有方位向分量且不随方位角变化, 由入射 TEM 主模、TEM 主模反射波, 以及衰减模式的 TM_{0n} 模反射波三部分组成:

$$\begin{aligned}
H_{\varphi}(\rho, z) = & \frac{1}{Z_{\text{TEM}}} \frac{V_0}{\ln(b/a)} \frac{1}{\rho} e^{-jk_0 \sqrt{\varepsilon_c} z} \\
& - \frac{1}{Z_{\text{TEM}}} \Gamma_0 \frac{V_0}{\ln(b/a)} \frac{1}{\rho} e^{jk_0 \sqrt{\varepsilon_c} z} \\
& - V_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{Z_{\text{TM}_{0n}}} \Gamma_n A_n(\rho) e^{j\beta_n z}
\end{aligned} \quad (6-3)$$

式 6-3 中各个符号含义是: ε_c 为同轴线填充介质复介电常数, Z_{TEM} 为 TEM 主模波阻抗, $Z_{\text{TM}_{0n}}$ 为 TM_{0n} 模波阻抗, β_n 为 TM_{0n} 模复传播系数。 Z_{TEM} 和 $Z_{\text{TM}_{0n}}$ 与真空波阻抗 Z_0 (约 377Ω) 的关系为 $Z_{\text{TEM}} = Z_0 / \sqrt{\varepsilon_c}$, $Z_{\text{TM}_{0n}} = Z_0 \beta_n / (k_0 \varepsilon_c)$, 因 TM_{0n} 模沿 $-z$ 方向衰减, 故 β_n 有负值虚部。

在同轴开路圆环缝隙上, 同轴线中的磁场和被测电介质中的磁场满足横向分量连续条件

$$H_{\varphi}(\rho, 0, z=0^-) = H_{\varphi}(\rho, 0, z=0^+) \quad (6-4)$$

取前 N 个 TM_{0n} 模式, 对式 6-4 圆环缝隙两侧的磁场分量分别乘以 $\rho A_n(\rho)$, 这里, $n=0, 1, 2, \dots, N$, 然后在场域 $a \leq \rho \leq b$ 进行积分, 得到关于反射系数 Γ_n 的 $N+1$ 阶线性方程组。如此便建立了 TEM 波反射系数 Γ_0 与被测液体复介电常数 ε_m 的数值关系。由于在实际应用中同轴孔径尺寸远小于被测液体中的波长, 当同轴线开路端附近的高次衰减模式可忽略不计时, 上述算式能被大大简化, 得到同轴开路端输入导纳 (简称输入导纳) 的闭式表达式

$$Y = j \frac{2\omega \varepsilon_0 \varepsilon_m}{\ln^2(b/a)} \int_a^b \int_a^b \int_0^\pi \frac{e^{-jk_0 \sqrt{\varepsilon_m} R}}{R} \cdot \cos \varphi' d\varphi' d\rho' d\rho \quad (6-5)$$

在上式中, $R = \sqrt{\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos \varphi'}$ 是场点到源点距离。按照式 (6-5), 在开路同轴探头横电磁波模型 (TEM 模型) 中, 输入导纳 Y 只取决于被测液体复介电常数 ε_m , 与同轴线填充介质复介电常数 ε_c 无关。这表明了该模型是电磁场严格模型的特例, 在数值求解上相对简单, 方便了通过 Y 的测量值反演待求解的复介电常数 ε_m 。将式 (6-5) 中谐函数 $e^{-jk_0 \sqrt{\varepsilon_m} R}$ 进行 Taylor 级数展开, 截取前 $Q+1$ 项, 输入导纳 Y 是复波数 $k_0 \sqrt{\varepsilon_m}$ 的 Q 次多项式

$$Y \doteq j \frac{2\omega \varepsilon_0 \varepsilon_m}{\ln^2(b/a)} \sum_{q=0}^Q \frac{(-1)^q j^q}{q!} (k_0 \sqrt{\varepsilon_m})^q I_q \quad (6-6)$$

式 6-6 中, I_q 代表在圆环缝隙上的积分, 它与频率及被测介质复介电常数无关,

$$\begin{aligned}
I_q = & \int_a^b \int_a^b \int_0^\pi R^{q-1} \cos \varphi' d\varphi' d\rho' d\rho, \\
& q = 0, 1, 2, 3, \dots, Q
\end{aligned} \quad (6-7)$$

多项式中的项数目取决于同轴孔径 ($2b$) 的电尺寸大小 $2k_0 b |\sqrt{\varepsilon_m}|$ 。输入导纳多项式 (6-6) 具有直观的物理意义。例如, 第一项 ($q=0$) 与频率成正比, 与被测介质复介电常数成正比, 可写作 $j\omega C_0 \varepsilon_m$, 代表了电容 C_0 加载了复介电常数为 ε_m 的电介质。电容值 C_0 与频率无关联, 因此代表了在直流或准静态频点工作的电容。

$$C_0 = \frac{2\varepsilon_0}{\ln^2(b/a)} I_0 \quad (6-8)$$

当同轴孔径的尺寸远远小于波长, 即在很低的工作频率时, 同轴开路端可近似地用电容

等效。

圆环缝隙上的积分 I_q ($q=0,1,2,3,\dots,Q$) 仅仅与同轴尺寸有关, 需要计算准确。由这些积分表达式可知 I_0 在 $\varphi'=0$ 且 $\rho=\rho'$ 时是奇异的。如果将 I_0 按三重积分直接处理是困难的。然而, 其最外重关于极径 ρ 的积分是良态的普通积分, 我们可以考虑将内重的关于 ρ' 和 φ' 的二重积分重新转换为面积分, 该面积分是被积函数 $1/\rho' \cdot \cos \varphi' / R$ 在同轴圆环孔径上的积分, 然后提取出一个相对化简的奇异被积函数 $1/\rho \cdot 1/R$, 形成了一个新的奇异面积分。该面积分更适合通过解析方式处理。上述过程可书写如下

$$\begin{aligned}
 I_0 &= \int_a^b \int_a^b \int_0^\pi \frac{\cos \varphi'}{R} d\varphi' d\rho' d\rho \\
 &= \int_a^b \frac{1}{\rho} \left(\iint_{S_A} \frac{1}{R} dS' \right) d\rho + \int_a^b \iint_{S_A} \left(\frac{1}{\rho'} \frac{\cos \varphi'}{R} - \frac{1}{\rho} \frac{1}{R} \right) dS' d\rho \\
 &= \int_a^b \frac{1}{\rho} \left(\iint_{S_o} \frac{1}{R} dS' - \iint_{S_i} \frac{1}{R} dS' \right) d\rho + \int_a^b \iint_{S_A} \left(\frac{1}{\rho'} \frac{\cos \varphi'}{R} - \frac{1}{\rho} \frac{1}{R} \right) dS' d\rho \quad (6-9) \\
 &= \int_a^b \frac{1}{\rho} \left(\iint_{S_o} \frac{1}{R} dS' - \iint_{S_i} \frac{1}{R} dS' \right) d\rho + \int_a^b \int_a^b \int_0^\pi \frac{\cos \varphi' - \frac{\rho'}{\rho}}{\sqrt{\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos \varphi'}} d\varphi' d\rho' d\rho
 \end{aligned}$$

其中 S_A 是内外径分别为 a 和 b 的半圆环区域。为了简化, 将式 (6-9) 面积分第一项的积分区域分为两个同轴的外半圆区域 S_o 和内半圆区域 S_i 之差。接下来, 将式 (6-9) 的第一项和第二项分别处理。对于第一项, 这里仅需讨论前一个奇异积分 I_{0,S_o} 的计算

$$I_{0,S_o} = \iint_{S_o} \frac{1}{R} dS' \quad (6-10)$$

首先注意到 $\rho=b$ 的特殊情形, 场点位于直径和圆周的一个交点, 此时上式能够解析求值, 结果是 $2b$ 。对于其他情形, 即当 $\rho < b$ 时, 如图 6-2 所示, 场点 P 离开圆周。

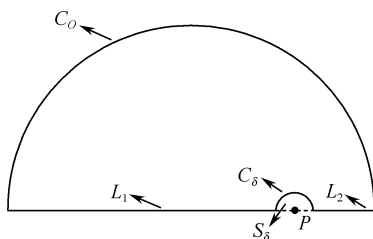


图 6-2 场点离开圆周时积分区域示意图

对于这样的情形, 标记一个圆心位于场点 P , 具有一个很小的半径值 δ 的小半圆区域 S_δ 。由于 S_δ 区域上的积分可以解析地处理, 因此将小半圆 S_δ 从积分域半圆区域排除掉。另一方面, 剩余区域上的积分可通过下述恒等式转化为线积分, 该恒等式如下

$$\frac{1}{R} = \nabla'_s \cdot (\vec{r}' - \vec{r})^0, \quad \vec{r}', \vec{r} \in S_o \quad (6-11)$$

这里 $\nabla'_s \cdot$ 是关于 \vec{r}' 的面散度算符。按照这样的步骤, 记积分域边界的单位外法向量是 \hat{u}' , 式 (6-10) 可如下处理

$$\begin{aligned}
& \iint_{S_o} \frac{1}{R} dS' \\
&= \iint_{S_o - S_s} \frac{1}{R} dS' + \iint_{S_s} \frac{1}{R} dS' \\
&= \iint_{S_o - S_s} \nabla'_s \cdot (\bar{r}' - \bar{r})^0 dS' + \pi\delta \\
&= \int_{C_o} (\bar{r}' - \bar{r})^0 \cdot \hat{u}' dl' + \int_{C_s} (\bar{r}' - \bar{r})^0 \cdot \hat{u}' dl' + \pi\delta \quad (6-12) \\
&= \int_{C_o + L_1 + L_2 + C_s} (\bar{r}' - \bar{r})^0 \cdot \hat{u}' dl' + \pi\delta \\
&= \int_{C_o} (\bar{r}' - \bar{r})^0 \cdot \hat{u}' dl' + (-\pi\delta) + \pi\delta \\
&= \int_{C_o} (\bar{r}' - \bar{r})^0 \cdot \hat{u}' dl'
\end{aligned}$$

式(6-12)最后得到的线积分沿孔径圆周,它是良态的积分,适合于数值方法求值。为了能便于直接地使用各类定积分数值积分法则,将式(6-12)中的矢量 \hat{u}' , \bar{r}' , \bar{r} 分别以表达式 $\hat{u}' = \hat{x} \cos \varphi' + \hat{y} \sin \varphi'$, $\bar{r}' = b\hat{u}'$, $\bar{r} = b\hat{u}'$ 替换,该线积分最终可化为一个定积分

$$\int_{C_o} (\bar{r}' - \bar{r})^0 \cdot \hat{u}' dl' = b \int_0^\pi \frac{b - \rho \cos \varphi'}{\sqrt{b^2 + \rho^2 - 2b\rho \cos \varphi'}} d\varphi', \quad \rho < b \quad (6-13)$$

这样即可完成式(6-9)第一项的处理。

对于式(6-9)的第二项,它事实上是一个普通积分,可以直接通过数值积分求值。当 $\rho' = \rho$ 且 $\varphi' = 0$ 时,该点对于第二项被积函数是一个第一类间断点,例如在 $\rho' - \varphi'$ 平面上分别选择两个趋近方向,

$$\begin{aligned}
& \lim_{\substack{\varphi' \rightarrow 0 \\ \rho' = \rho}} \frac{\cos \varphi' - \frac{\rho'}{\rho}}{\sqrt{\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos \varphi'}} \\
&= \lim_{\substack{\varphi' \rightarrow 0 \\ \rho' = \rho}} \sin^2 \frac{\varphi'}{2} \frac{-1}{\rho \left| \sin \frac{\varphi'}{2} \right|} \quad (6-14) \\
&= 0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \lim_{\substack{\varphi' = 0 \\ \rho' \rightarrow \rho}} \frac{\cos \varphi' - \frac{\rho'}{\rho}}{\sqrt{\rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos \varphi'}} \\
&= \frac{1}{\rho} \lim_{\substack{\varphi' = 0 \\ \rho' \rightarrow \rho}} \frac{\rho - \rho'}{|\rho - \rho'|} \quad (6-15) \\
&= \pm \frac{1}{\rho}
\end{aligned}$$

即可证实第二项积分是一个普通积分。

其他的圆环缝隙上的积分 I_q ($q \neq 0$)则可直接采取数值法求值,或者先多项式展开,然后对于可解析求值的积分项尽量地解析求值,以保证计算准确度。

为了进行验证，选取一些不同规格的开路同轴线为例，对 $I_q(q=0,1,2,3,\dots,Q)$ 求值，验证同轴圆环缝隙积分的数值计算。在计算中，所有最终形式的普通积分均以 Simpson 法则求值。计算程序以 Fortran90 编写实现。表 6-1 给出了对于较小尺寸和中等尺寸规格同轴线的积分计算结果。在所有的例子中，选取足够数目的积分点以保证求值收敛，场变量 ρ 、源变量 ρ' 和 φ' 相应的积分点数目分别选择为 5,5,37。静态项圆环缝隙积分 I_0 转化得到的线积分的积分点数目选择为 121，即方位角每 1.5° 一个积分点。

表 6-1 几种市售同轴线尺寸规格对应的积分 I_0 和 I_2 计算结果

同 轴 线	b (mm)	a (mm)	$I_0\times10^{-3}$	$I_2\times10^{-9}$	方 法 来 源
2.2mm, 聚四氟乙烯	0.838	0.255	1.0063476	-0.22040773	A
			0.99058927	-0.22018405	B
3.6mm, 聚四氟乙烯	1.499	0.455	1.8035206	-1.2631749	A
			1.77531131	-1.26188826	B
6.4mm, 聚四氟乙烯	2.655	0.824	3.1407047	-6.9365091	A
			3.09155881	-6.92967372	B
8.3mm, 聚四氟乙烯	3.620	1.124	4.2807511	-17.577911	A
			4.21373732	-17.5606001	B
7.0mm, 空气	3.500	1.520	2.9412541	-12.198464	A
			2.88055348	-12.194870	B
14.0mm, 空气	7.145	3.102	6.0068578	-103.81462	A
			5.88293048	-103.784060	B

A：本研究报告，B：参考文献

表 6-2 是一个较大尺寸规格同轴线积分计算的结果。由于尺寸增大，主要应增加场径向变量 ρ 和源径向变量 ρ' 对应的积分点数目，两者均选择为 17。源方位角变量对应的积分点数目选择为 61， I_0 相关的线积分的积分点数目选择为 121。

表 6-2 外半径 16.25mm 和内半径 5.00mm 同轴线圆环缝隙积分计算结果

积 分	本研究报告	参 考 文 献
I_0	1.9522399e-02	0.0196
I_1	0	0
I_2	-1.5962028e-06	-1.5962e-06
I_3	-4.4886214e-08	-4.4892e-08
I_4	-1.0890376e-09	-1.0892e-09
I_5	-2.5949845e-11	-2.5953e-11
I_6	-6.2519608e-13	-6.2517e-13
I_7	-1.5347300e-14	-1.5343e-14
I_8	-3.8437741e-16	-3.8418e-16
I_9	-9.8137262e-18	-9.8067e-18

续表

积 分	本研究报告	参考文献
I_{10}	-2.5503010e-19	-2.5480e-19
I_{11}	-6.7342531e-21	-6.7277e-21
I_{12}	-1.8038880e-22	-1.8021e-22
I_{13}	-4.8943573e-24	-4.8897e-24
I_{14}	-1.3408342e-25	-1.3421e-25
I_{15}	-3.7241676e-27	-3.7217e-27
I_{16}	-1.0420909e-28	-1.0416e-28
I_{17}	-2.9401146e-30	-2.9394e-30
I_{18}	-8.3570700e-32	-8.3569e-32
I_{19}	-2.3914877e-33	-2.3920e-33

根据表 6-1 和表 6-2 的比较结果可见，本研究报告计算结果和参考数据对比，在大多数例子中体现了很好的一致性。第一项静态积分计算结果在有的例子中与参考数据相比偏差稍明显，但在最坏情况下，该偏差未超过 2.5%。需要指出的是，由于大多数的积分项无法单纯地解析求值，尤其是静态项，因此需要寻找了更多的可靠的参考数据与本研究报告计算结果作比较。根据静态电容表达式（6-8），计算了孔径尺寸依次增大的三种同轴线规格所对应的静态电容的值。表 6-3 给出了本研究报告计算值与三组相关文献结果的对比。同轴线内外导体半径 a 和 b 分别是：0.455mm/1.499mm，0.824mm/2.655mm，1.124mm/3.620mm。积分点数的选取同表 6-1，普通积分项的场区和源区径向上的定积分均是选取 5 个积分点，源区方位向上的定积分选取了 37 个积分点，半圆周上的线积分按照每 1.5 度方位角共选取 121 个积分点。

表 6-3 三种规格开路同轴线的静态电容值对比

同轴线规格	静态电容（单位：pF）					
	本研究报告	文献 1	文献 2	文献 3		
				实验值	理论值	
					有限元	矩量法
3.6mm， 聚四氟乙烯	0.022468	0.02212	0.0226	0.0224±0.00146	0.0227	0.0217
6.4mm， 聚四氟乙烯	0.040627	0.03999	0.0402	0.0394±0.00161	0.0405	0.03879
8.3mm， 聚四氟乙烯	0.055416	0.05455	0.0548	0.055±0.0055	—	—

表 6-3 的数据中，文献 1 讨论了输入导纳的准静态表达式，该表达式是式（6-6）的前三项，转化圆环缝隙积分 I_0 为椭圆积分进行处理。文献 2 讨论开路同轴探头法测量一定厚度单层均匀介质复介电常数。被测介质层与法兰面贴合，另一面附着金属板（电壁）。计算方法是基于分层媒质的谱域法。静态电容数据由被测介质为厚度 $d = 10b$ 的空气层时对应的输入导纳值得出，按该文献给出的计算数据，当 $d > 2b$ 时，金属背板对同轴开路端输入导纳影响非常

小, 因此可作为对比数据。文献 3 给出了用两种数值方法 (有限元法、矩量法) 得到的静态电容值 (称作理论值), 并提供了实验测量值。因此表 6-3 表明了 TEM 模型法得出的静态电容值与相关文献不同方法的结果有很好的一致性。

以输入导纳多项式 (6-6) 作为测量模型的依据, 从输入导纳值可计算被测液体的复介电常数。使用矢量网络分析仪测量探头系统的反射系数, 通过单端口反射系数测量去嵌入技术, 即用探头测量三个标准负载, 例如置于空气 (开路)、贴合短路块、浸入去离子水, 完成探头浸入被测液体得到的反射系数的标定过程, 即可得出被测液体相应的输入导纳值。输入导纳多项式方程的根代表了被测液体的复波数, 可选用最速下降法迭代求解。经过剔除不符合物理意义的伪解, 最终获得被测液体的复介电常数。测量液体复介电常数的数据处理过程如图 6-3 所示。

6.2 数值实验

本节以开路同轴探头 TEM 模型法计算了几种常见规格开路同轴线对应负载的输入导纳值。相应的反过程, 根据已知的输入导纳数据求解被测液体的复介电常数。计算结果用文献数据作为参考进行比较。

6.2.1 输入导纳计算

以空气填充同轴线的开路端输入导纳值计算为例, 空气填充同轴线开路端外导体端接于无限大导体屏, 在不同内外导体半径比(b/a)情况下, 随频率升高 (波长 λ 减小) 电导和电纳的计算值如表 6-4(a), (b) 所示, 同轴特性导纳记作 Y_0 。Marcuvitz 在《波导手册》(Waveguide Handbook) 中给出了空气填充同轴线开路端等效电导和等效电纳的表达式。值得注意的是, 与输入导纳多项式不同, Marcuvitz 给出的表达式不含奇异积分, 其方法通过积分变换消除了 TEM 模型导纳表达式中自由空间格林函数的奇异性。本研究报告计算值与参考值 (括号中的数据, 引自 Marcuvitz 的波导手册, 该值通过量取导纳曲线图纵坐标得到) 吻合很好, 表明了两种计算方法的结果相互印证。

为了考查输入导纳在不同截断多项式数目下的收敛性, 以复介电常数频率特性已知的去离子水作为被测液, 分别取 6 项, 11 项, 16 项, 21 项, 得到四组电导和电纳计算结果, 在图 6-4 中进行了对比。同轴内外半径为 0.4mm 和 1.14mm。随着项数目的增加, 可以观察到导纳值在整个频段上获得了很好的收敛。在本例中, 取 6 项截断即可获得不超过 6GHz 频段上导纳值的收敛。为了保证导纳计算结果在给定频段的收敛, 一般可选取该频段最高频率需要保留的项数目得到截断多项式。

图 6-5 给出了以同样尺寸规格的开路同轴探头 (同轴的外径和内径分别为 1.14mm 和 0.4mm) 测量甲醇输入导纳计算结果。本研究报告计算结果与文献中采用 Marcuvitz 积分表达式的结果进行对比。数值参数与上例蒸馏水测量的收敛设置相同。可以观察到两组导纳结果相互之间非常接近, 表明了两种方法的数值一致性。

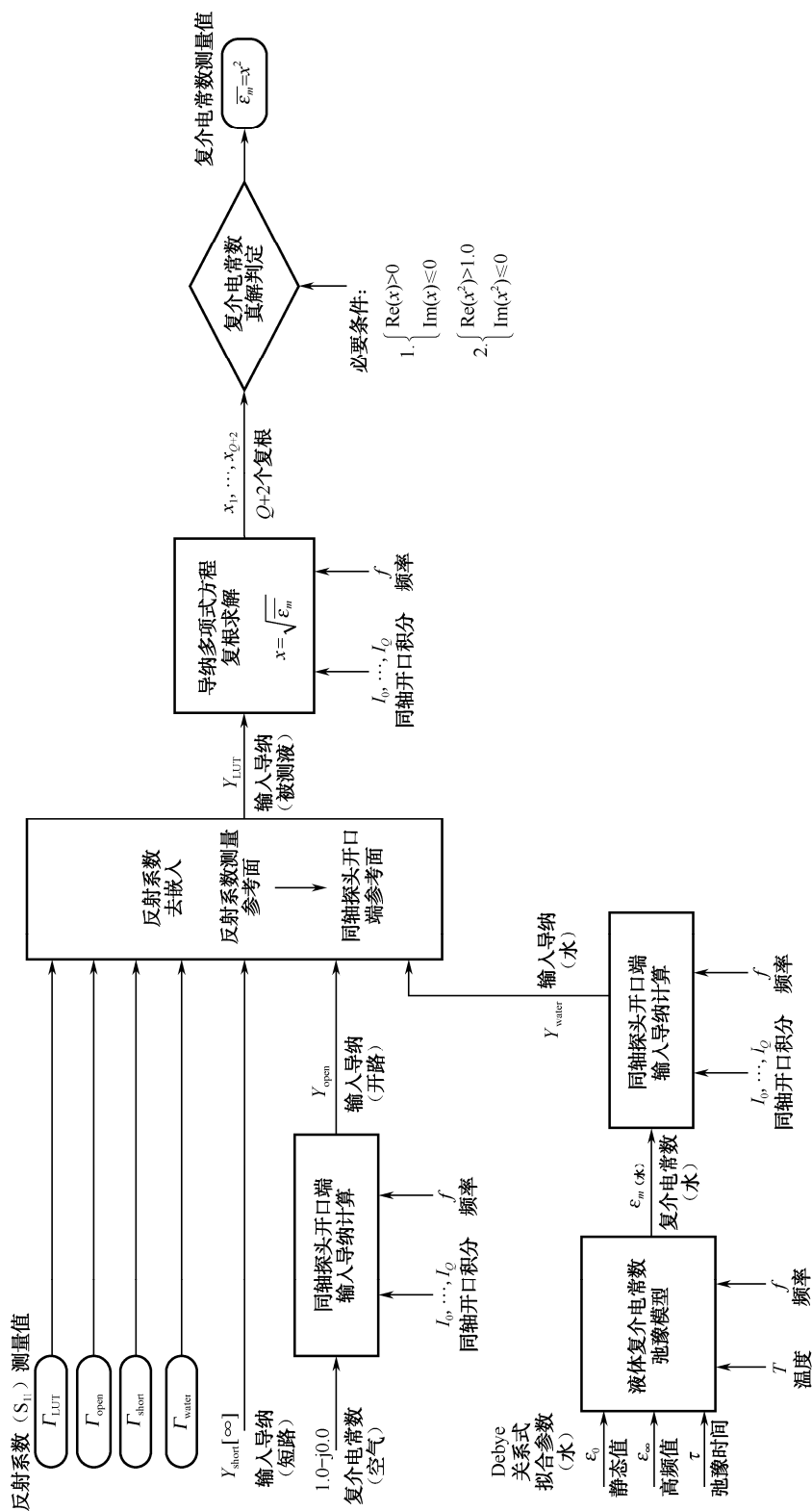


图6-3 开路同轴探头-TEM模型法测量液体复介电常数原理图

表 6-4 (a) 空气填充开路同轴线归一化输入导纳值: 归一化电导(G/Y_0)

$(b-a)/\lambda$	$b/a=2.0$	$b/a=2.5$	$b/a=3.0$	$b/a=4.0$
0.10	6.914e-2 (6.95e-2)	3.396e-2 (3.79e-2)	2.142e-2 (2.21e-2)	1.208e-2 (1.31e-2)
0.15	0.2721 (0.270)	0.1465 (0.146)	9.579e-2 (9.86e-2)	5.569e-2 (5.80e-2)
0.20	0.6010 (0.601)	0.3692 (0.378)	0.2544 (0.258)	0.1544 (0.162)
0.25	0.9183 (0.919)	0.6723 (0.678)	0.4960 (0.450)	0.3186 (0.319)
0.30	1.068 (1.07)	0.9720 (0.975)	0.7809 (0.781)	0.5379 (0.540)
0.35	1.019 (1.02)	1.176 (1.17)	1.045 (1.05)	0.7822 (0.781)
0.40	0.8893 (0.887)	1.237 (1.24)	1.229 (1.23)	1.011 (1.02)
0.45	0.8369 (0.839)	1.177 (1.18)	1.304 (1.30)	1.188 (1.19)

表 6-4 (b) 空气填充开路同轴线归一化输入导纳值: 归一化电纳(B/Y_0)

$(b-a)/\lambda$	$b/a=2.0$	$b/a=2.5$	$b/a=3.0$	$b/a=4.0$
0.10	0.4641 (0.464)	0.3882 (0.386)	0.3426 (0.343)	0.2894 (0.290)
0.15	0.7111 (0.711)	0.6211 (0.619)	0.5513 (0.552)	0.4641 (0.464)
0.20	0.8210 (0.817)	0.8152 (0.813)	0.7514 (0.748)	0.6459 (0.644)
0.25	0.7195 (0.717)	0.8942 (0.891)	0.8892 (0.881)	0.8048 (0.801)
0.30	0.4809 (0.485)	0.8201 (0.818)	0.9188 (0.913)	0.9061 (0.899)
0.35	0.2789 (0.279)	0.6236 (0.622)	0.8280 (0.824)	0.9252 (0.920)
0.40	0.2373 (0.238)	0.3901 (0.385)	0.6463 (0.647)	0.8574 (0.853)
0.45	0.3337 (0.330)	0.2106 (0.214)	0.4321 (0.432)	0.7202 (0.716)

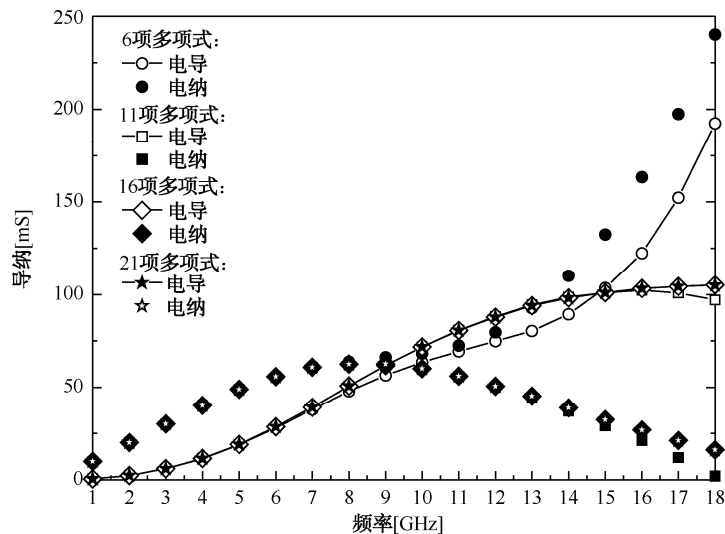


图 6-4 开路同轴探头输入导纳计算随多项式项数增加的收敛情况 (测量去离子水)

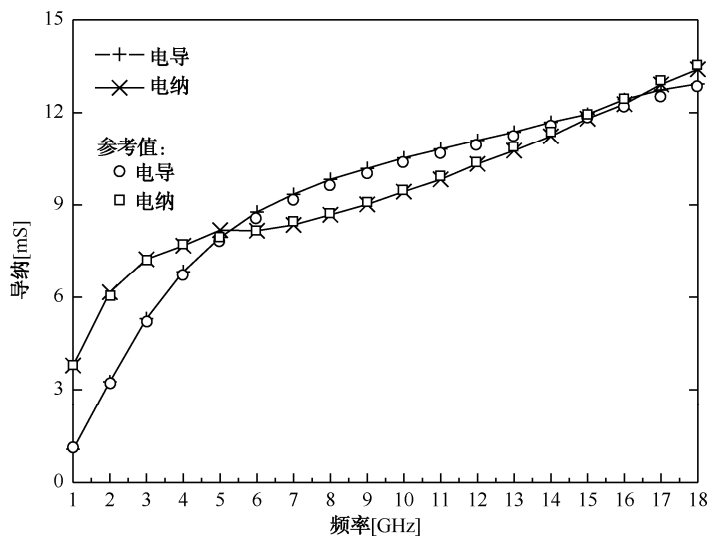


图 6-5 开路同轴探头输入导纳计算(测量甲醇)

6.2.2 复介电常数求解

探头开路端输入导纳级数表达式 (6-6) 能够按照收敛残差要求截断, 反过来, 根据已知/已测的输入导纳数据得到待测复介电常数的过程是求解代数方程。随多项式数目增大, 验证了复介电常数求解的收敛。求得甲醇在温度 25℃ 频率 1GHz~18GHz 复介电常数如图 6-6 所示。选择的参照数据引自纯净液体和稀溶液介电数据手册。甲醇对应的输入导纳测量数据引自文献, 探头的同轴外导体内径为 1.14mm, 内导体外径为 0.40mm。在求解复介电常数过程中, 多项式项数目分别截取为 4, 8, 12, 20, 24。经验证, 取 4 项仅可满足在低于 6GHz 频率范围复介电常数实部和虚部具有三位有效数字收敛精度; 当取 8 项时, 即可在整个频段上收敛精度达到三位有效数字。

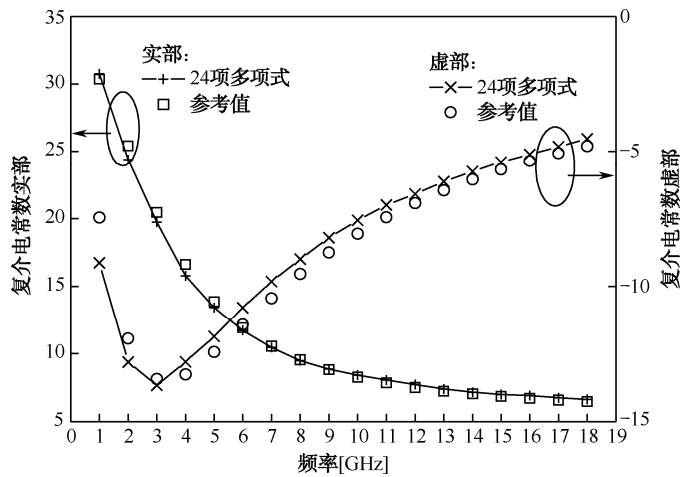


图 6-6 甲醇在 25℃ 频率 1G~18GHz 的复介电常数

表 6-5 给出了在每个频点上分别取 24 项多项式得出的符合物理意义的复介电常数值。被括号标注的值表示在该频点符合物理意义，但不满足介电常数在频域的连续性，这样的多余值被剔除后，留下了唯一的真值。

表 6-5 代数方程（24 项多项式）求解甲醇（25℃）复介电常数

频率 (GHz)	复介电常数值	频率 (GHz)	复介电常数值
1.0	30.760378-9.132423j	10.0	8.4295961-7.5713411j
2.0	24.387563-12.811015j	11.0	8.0756121-6.9990909j
3.0	19.734668-13.657343j	12.0	7.7221701-6.5984179j
4.0	15.773242-12.796726j	13.0	7.4038802-6.1317691j (88.066331-396.92502j)
5.0	13.425614-11.864052j	14.0	7.1735831-5.7643924j (75.748314-342.25486j)
6.0	11.709311-10.798288j	15.0	7.0116928-5.3981178j (65.813144-298.16209j)
7.0	10.453771-9.8249285j	16.0	6.9239535-5.1109948j (57.671345-262.07598j)
8.0	9.4881266-8.9996146j	17.0	6.7616046-4.8312405j (50.942570-232.16429j)
9.0	8.8581294-8.2054933j	18.0	6.6299361-4.5335875j (45.308643-207.10809j)

同上例，根据水在频率 1GHz~18GHz 对应的输入导纳测量数据，按照多项式项数目依次增加求解复介电常数。随着多项式保留更多的项，当项数目不低于 16 时，相比 4 项多项式，复介电常数实部和虚部在整个频段上都能够达到三位有效数字收敛精度，求解结果与文献用同一导纳数据计算的复介电常数结果吻合很好，如图 6-7 所示。

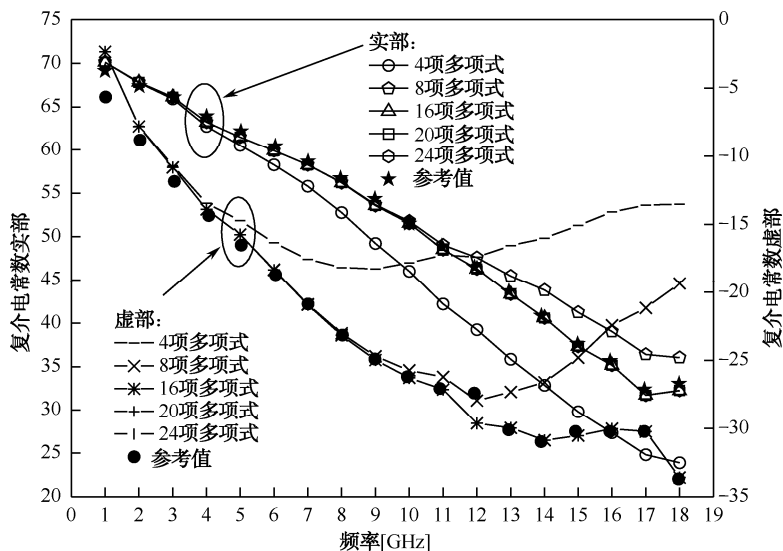


图 6-7 水在 25℃ 频率 1GHz~18GHz 复介电常数求解结果

6.3 测量实验结果和探讨

在开路同轴探头 TEM 模型法数值实验基础上, 用内外导体半径分别是 0.375mm 和 1.60mm 的探头测量了食盐水的相对介电常数和电导率。探头开路端的法兰直径是 19.2mm。按照图 6-3 给出的测量原理流程图, 进行四组操作: 将探头开路、浸入去离子水、贴合短路块、浸入被测食盐水, 用网络分析仪 Agilent E5071C 在每个频点记录反射系数数据。食盐水和去离子水均使用 25mL 烧杯盛装。去离子水复介电常数参考值使用了 Udo Kaatz 给出的数据。图 6-8 和图 6-9 分别给出了浓度 1% 和浓度 3.5% 食盐水在温度 23.8℃ 时 0.3GHz~4.5GHz 频段上的测量结果, 参考值是 Klein-Swift 以及 Wentz 拟合弛豫表达式给出的值。

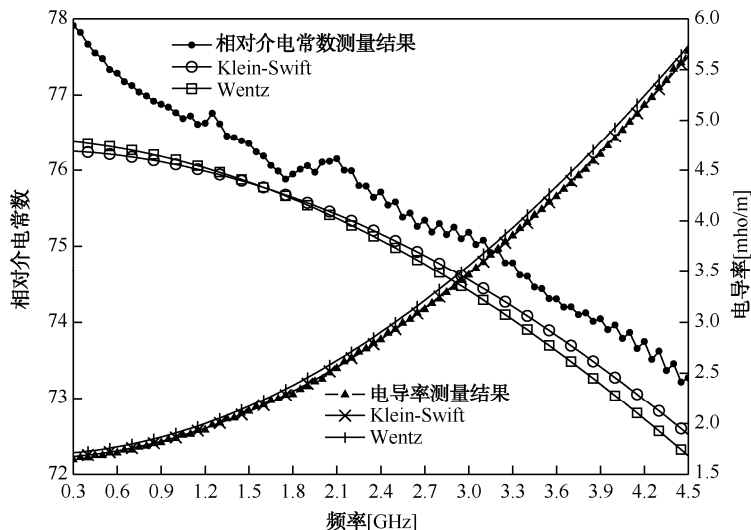


图 6-8 浓度 1.0% 食盐水在 23.8℃ 频率 0.3G~4.5GHz 介电特性

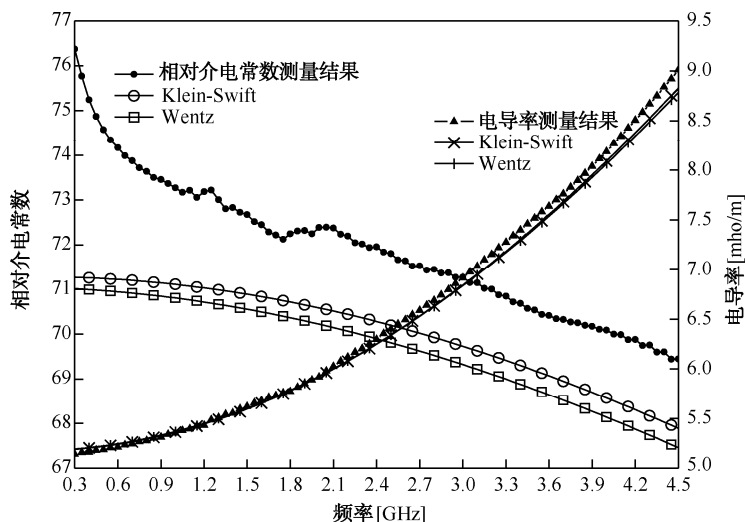


图 6-9 浓度 3.5%食盐水在 23.8℃ 频率 0.3G~4.5GHz 介电特性

在低频端, 图 6-8 和图 6-9 数据都表现出频率越低探头得到的相对介电常数结果与参考值的偏差越大, 但除了 3.5%食盐水在低频端 0.3GHz~0.6GHz 的相对介电常数数据正常, 其余测量结果偏离参考值均小于 5%。这一现象主要成因是频率低于 0.6GHz, 探头(同轴孔径 3.2mm)的灵敏度变差, 即反射系数变化量与相对介电常数变化量的比值降低。尽管开路同轴探头的测量频段在理论上没有低频点限制, 但在低频为了获得好的灵敏度, 同轴孔径尺寸需要增大。

测量实验中, 探头竖直进入烧杯口, 同轴开路端法兰面没入被测液中。相比理论模型的主要差别是: 法兰尺寸有限, 不是半径无限大的理想导电平面; 被测液体积有限, 不是充满导电面下方半空间。一定尺寸的法兰和被测样品若足以模拟无限大理想情形, 则要求截断边界的电磁场已充分地衰减。取与探头轴线重合的一段圆柱体, 其上底面与法兰面相接, 考查通过圆柱侧面和下底面的电磁功率。通过该边界的电磁功率分为辐射功率和无功功率, 两者均满足功率守恒关系。记圆柱体区域为 V , 边界面为 \bar{S} , 按照圆柱体边界面的复功率与其体积中的复功率之和等于输入导纳获得的复功率, 有

$$\iint_{S_1} \bar{E} \times \bar{H}^* \cdot d\bar{S} + \iiint_V \sigma |\bar{E}|^2 dV - j\omega \iiint_V (\epsilon_r' \epsilon_0 |\bar{E}|^2 - \mu_0 |\bar{H}|^2) dV = |U_0|^2 (1 + \Gamma)(1 + \Gamma^*)(G - jB) \quad (6-16)$$

式(6-16)中, ϵ_r' 与 σ 分别是圆柱体的相对介电常数与电导率, U_0 和 Γ 分别是同轴开路端参考面的入射电压和反射系数, G 与 B 分别是同轴探头的输入电导与电纳。

我们定义两个比值分别来描述通过边界面 S_1 的外向辐射功率和无功功率的相对大小。设同轴线特性导纳是 Y_C , 记 α 是外向辐射功率与同轴线入射功率比值

$$\alpha = \frac{\operatorname{Re} \left\{ \iint_{S_1} \bar{E} \times \bar{H}^* \cdot d\bar{S} \right\}}{|U_0|^2 \operatorname{Re}(Y_C^*)} \quad (6-17)$$

记 β 是无功功率与输入导纳的无功功率比值

$$\beta = \frac{-\operatorname{Im}\left\{\iint_{S_1} \vec{E} \times \vec{H}^* \cdot d\vec{S}\right\}}{|U_0|^2 (1 + \Gamma)(1 + \Gamma^*) B} \quad (6-18)$$

圆柱体深度和直径大小均取为上例探头的法兰直径大小 (19.2mm)，表 6-6 给出了上例尺寸的探头分别用于空气、水、食盐水复介电常数测量实验时边界面的两项功率比。探头同轴线特性阻抗取值 42.96Ω。

表 6-6 边界面与同轴开路端面的功率比

频率 (GHz)	空气		水 (25℃)		1%浓度食盐水 (25℃)	
	α	β	α	β	α	β
1.0	6.41e-008	2.59e-004	2.66e-003	9.23e-005	1.37e-003	-1.24e-004
2.0	1.02e-006	2.54e-004	1.94e-002	-6.14e-004	8.22e-003	-8.07e-004
3.0	5.18e-006	2.45e-004	3.39e-002	-1.74e-003	1.51e-002	-1.54e-003
4.0	1.64e-005	2.33e-004	3.17e-002	-2.52e-003	1.50e-002	-1.89e-003
5.0	3.99e-005	2.18e-004	2.06e-002	-2.48e-003	1.03e-002	-1.72e-003
6.0	8.26e-005	1.99e-004	1.06e-002	-1.86e-003	5.58e-003	-1.24e-003

α —辐射功率与入射功率比, β —无功功率比

无功功率比 β 值的负号表示边界面的电抗性质(表现为容抗还是感抗)与同轴开路端面的情况相反。该探头同轴孔径大小 3.20mm, 通过数据可见, 在 1.0GHz~6.0GHz 频段, 当探头置于空气时, 同轴开路端面辐射功率相对非常小, 且电磁场集中在开路端圆环缝隙周围很小的局部区域, 因此法兰尺寸进一步增大几乎不会影响反射系数, 即该尺寸可以模拟无限大理想情况。探头没入液体, 当液深不少于 19.2mm 时, 即使测量相对低损耗的水, 边界面外向辐射功率占比入射功率也不超过 3.5%, 交换的无功功率与同轴开路端无功功率比值不超过 0.3%, 而食盐水损耗正切更大, 吸收的有功功率更多, 相比水在每个频点上外向辐射功率均更小。另一方面, 实验中 25mL 烧杯容积是上述圆柱体积的 4.5 倍, 功率比进一步减小, 可以认为边界面电磁场有足够的衰减。综上, 无限大尺寸理想模型能够准确地反映实际测量实验里反射系数与被测介质复介电常数的关系。

第 7 章 液体填充矩形波导标准场装置

比吸收率（SAR）测量仪器通常用有源电场探头读取电场强度数据。有源电场探头对场强的响应是电压，事先需要在工作频点对场强—电压响应关系作拟合，涉及场强计量标准，两类基本方法分别是标准天线法和标准场法。在空气环境中通过各类标准场装置标定电场探头，例如横电磁波小室，标准天线的近场或远场测量装置，矩形开口波导探头校准装置等。在盛装液体的装置中产生能按电磁理论计算的分析场（analytical field）即可作为标准场，得到横纵坐标分布的场强值。SAR 测试电场探头对场强的响应依赖于环境介电性质，在所需电介质目标值的组织模拟液中建立所需频点的已知电磁场可以实现探头的标定，这是比较测量法。

本章提出利用波导台阶改进现有的三段级联波导标准场装置过渡波导段，避免因其内壁与介质匹配窗粘接失效而导致漏液，以完善介质匹配窗装配的可靠性。为了得出波导台阶出现后液体填充开口波导段的电场值，研究了如何根据直波导入射激励求解液体波导段的计算方法，用典型案例验证数值结果，考查台阶对均匀波导的影响，并解释相关数据的物理意义。

7.1 标定 SAR 近场探头的三段级联波导标准场实验装置

波导小室可建立液体标准场，但这一传输结构不便于 SAR 探头浸没在液体里定位操作。在国际电工协会（IEC）、电气电子工程师协会（IEEE）、中国计量科学研究院、工业和信息化部电信研究院，以及国家无线电监测中心等制定的各类无线通信行业标准中，都建议使用校准波导（calibration waveguide）建立标准场实现 SAR 测试探头的标定或验证。除此装置外，尽管温度探头也可以进行电场探头校准传递，但需要对该过程的系统误差作充分的评估。对此，IEEE 标准也仅是建议在所使用的大尺寸波导不易获得的情况下，例如低于 500MHz 频率标准波导横截面长宽尺寸较大且很少加工应用，这时才考虑选择温度方法。

目前，国内外通常用顶端面敞口的矩形波导装置在有耗液体中建立标准场。波导装置竖摆放，如图 7-1 所示，底座是用同轴-波导转换馈电的直波导，经由过渡波导与液体波导实现三段波导的级联。液体波导中轴线的电场值用作标准场的定值。

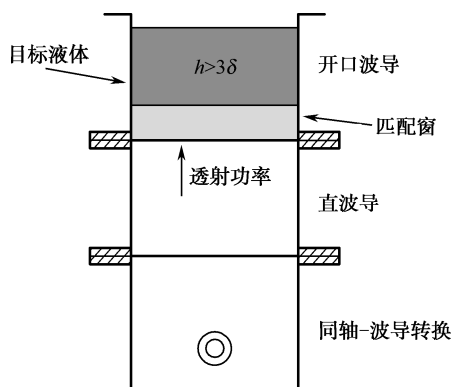


图 7-1 三段级联波导装置示意图

介质匹配窗上部的波导盛装组织模拟液，下部的空气直波导连接同轴-矩形波导转换器，激励出传播的 TE_{10} 主模。三段波导由于横截面完全相同，主模入射不会耦合出现高次模式，过渡波导和液体波导内也只有主模。一部分同轴线馈送功率经过该校准波导装置进入组织模拟液，透射在液体波导中形成了 TE_{10} 模标准场，组织模拟液的导电性使得场强沿高度方向从液体深处至浅处逐渐衰减，当选择液深尺寸达到 3~5 倍趋肤深度 (δ) 时，可使敞口端液面处的相对场强值降到可忽略不计。Pokovic 在博士论文中最早提出用这样的校准波导装置标定近场测量探头，Pokovic 和同事开展了覆盖射频至毫米波频段的一系列近场探头的测量和标定。在 2005 年，IEEE 工作组发布了标定非天线类近场探头标准 IEEE Std 1309-2005。在国内，国家无线电监测中心的研究人员用标定过的瑞士 SPEAG 公司 ER3DV6 探头对这种液体波导中轴线上场强分布进行了测量，用标准场数值验证了标定的准确度。中国计量科学研究院能源环境所也在校准波导近场探头标定方面开展了研究工作，使用 BJ9 和 BJ22 波导分别在 900MHz 和 1800MHz 频点对探头标定。波导装置与信号源、功放、双定向耦合器，以及功率计等构成完整的测量装置，如图 7-2 所示。

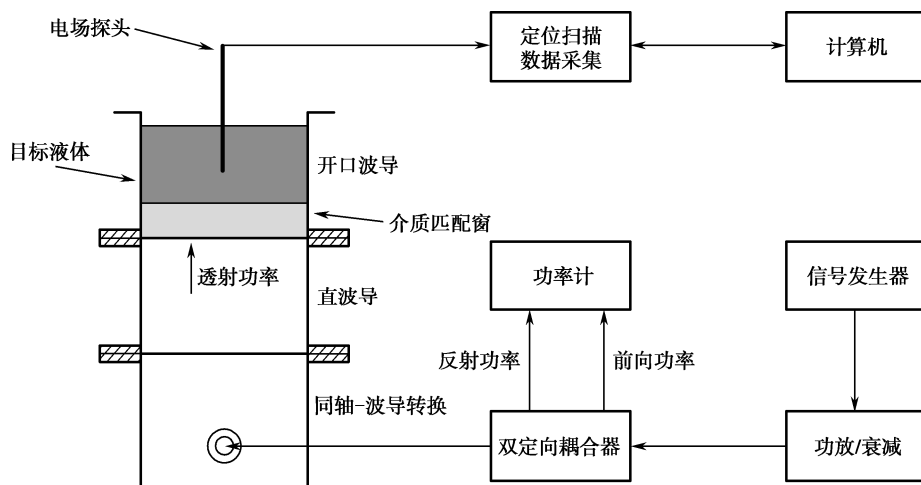


图 7-2 波导标准场实验装置原理图

液体标准场场强可溯源到双通道有功功率和液体复介电常数参考值。因此使用横截面均匀的校准波导在液体标准场中标定探头，不确定度评估考虑因素主要是：(1) 双定向耦合器

和功率计应能准确确定液体波导的透射功率；（2）液体复介电常数参考值的准确度应满足应用指标。

7.2 用波导台阶完善过渡波导介质匹配窗的装配可靠性

现有的波导装置在多次装液使用之后有介质匹配窗装配工艺失效的现象，在匹配窗与贴合波导壁之间会出现小缝隙，致使盛装液体渗漏到馈电的空气直波导内。导致工艺失效的直接原因是，介质匹配窗在对液体承重的情况下与过渡波导的内壁之间有不可避免的浸润作用。提出的解决办法是适当加大过渡波导的横截面长宽尺寸，并扩大波导端面法兰的尺寸，在过渡波导与空气直波导连接面以及过渡波导与液体波导连接面上形成两处波导台阶。这样做的好处，一是波导台阶实现了对液体承重，且过渡波导侧壁与匹配窗之间不再与液体接触；二是用装配螺钉紧固波导法兰端面，即可使得介质匹配窗在横截面上与波导台阶紧密地压合。改进前后的波导级联结构，如图 7-3 所示。

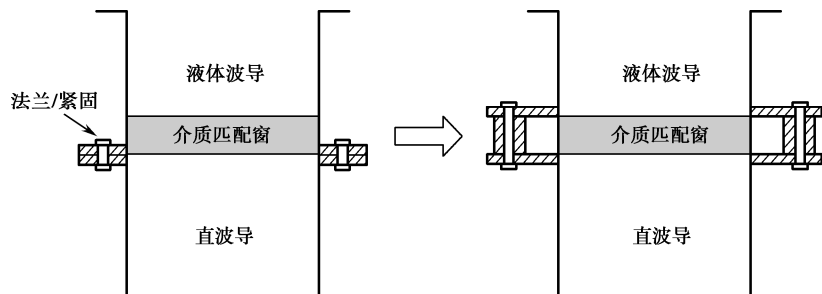


图 7-3 波导台阶与介质匹配窗

波导台阶造成了级联波导横截面的突变，会改变装置的传输特性，在液体波导中激励起高次模。直波导反射特性也有改变，反射波成分会出现渐衰的高次模。另一方面，由于介质匹配窗厚度有限且损耗较低，直波导和液体波导的高次模在两处台阶之间的过渡波导中相互耦合。带有台阶的级联波导的不连续性是只在横截面上出现的突变，不连续面两侧波导横截面的形状大小固定不变。鉴于此，新装置中的场也是可计算的。以波导的模式展开为基础可得出液体波导的场。

7.2.1 波导结构不连续性分析的模式匹配法

常用金属波导的横向界面都是封闭的，例如矩形波导和圆波导有一个封闭边界，同轴波导有两个封闭边界。波导的导体界面可被认为具有理想的导电性，即 PEC（Perfect Electrical Conducting）电壁。波导腔填充空气或者均匀各向同性的线性媒质。

一段均匀直波导，其纵向即中心轴与柱坐标系 z 轴重合，可将电场 \vec{E} 和磁场 \vec{H} 分解为相应的纵向场量 $E_z \hat{z}$ 和 $H_z \hat{z}$ ，以及横向场量 \vec{E}_t 和 \vec{H}_t 。通过将时谐电磁场 Maxwell 方程组的两个旋度方程在纵向和横向分解，可得出纵向横向场量要满足 Helmholtz 方程。横向电场和横向磁场可用一组满足边界条件的正交函数即场量模式 $\vec{E}_{t,n}$ 和 $\vec{H}_{t,n}$ 进行级数展开

$$\vec{E}_t(u, v, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \vec{E}_{t,n}(u, v, z) \quad (7-1)$$

$$\bar{H}_t(u, v, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{H}_{t,n}(u, v, z) \quad (7-2)$$

其中, $\bar{E}_{t,n}$ 和 $\bar{H}_{t,n}$ 分别表示电场和磁场的第 n 个横向模式, u 和 v 是横坐标。横向模式可在纵向和横向分离变量, 进一步表达为

$$\bar{E}_{t,n}(u, v, z) = U_n(z) \bar{e}_n(u, v) \quad (7-3)$$

$$\bar{H}_{t,n}(u, v, z) = I_n(z) \bar{h}_n(u, v) \quad (7-4)$$

幅度 U_n 和 I_n 可被定义为第 n 个模式的电压和电流, 它们在纵向是沿 $+z$ 或 $-z$ 方向传播的波, 可用谐函数表达为

$$U_n(z) = U_{n,0}^+ e^{-j\beta_n z} + U_{n,0}^- e^{j\beta_n z} \quad (7-5)$$

$$I_n(z) = I_{n,0}^+ e^{-j\beta_n z} - I_{n,0}^- e^{j\beta_n z} \quad (7-6)$$

相应波阻抗

$$\eta_n = \frac{U_{n,0}^+}{I_{n,0}^+} = \frac{U_{n,0}^-}{I_{n,0}^-} \quad (7-7)$$

横向电场和横向磁场可被纵向场量唯一确定, 例如, 在复介电常数为 $\bar{\epsilon}_r$ 的电介质填充的波导中, 横向场量对于纵向场量的依赖关系是

$$\bar{E}_t = \frac{j k_0}{k_t^2} \eta_0 \hat{z} \times \nabla_t H_z + \frac{\pm j \beta}{k_t^2} \nabla_t E_z \quad (7-8)$$

$$\bar{H}_t = -\frac{j k_0 \bar{\epsilon}_r}{\eta_0 k_t^2} \hat{z} \times \nabla_t E_z + \frac{\pm j \beta}{k_t^2} \nabla_t H_z \quad (7-9)$$

其中, ∇_t 代表横向 Nabla 算符; 真空波数记作 k_0 ; β 是纵向波数, 即传播系数; $\pm j\beta$ 在传播方向为 $+z$ 时取负号, 传播方向为 $-z$ 时取正号。横向波数 k_t 与纵向波数 β 满足本征值方程 $k_t^2 + \beta^2 = k_0^2 \bar{\epsilon}_r$ 。真空波阻抗 $\eta_0 = 120\pi \Omega$ 。

全体模式按照 E_z 等于零或 H_z 等于零, 或者 E_z, H_z 同时为零, 可分为三类, 分别称为横电模 (TE 模), 横磁模 (TM 模), 以及横电磁模 (TEM 模)。单导体波导腔无法支持 TEM 模, 三种模式性质见表 7-1。

表 7-1 波导 TE/TM/TEM 模的性质

特 征	电场/电压	磁场/电流
横向场	$\bar{E}_t = \sum_m V_m \bar{e}_m$	$\bar{H}_t = \sum_m I_m \bar{h}_m$
幅度	$V_m(z) = V_m^+ e^{-j\beta_m z} + V_m^- e^{j\beta_m z}$	$I_m(z) = \frac{V_m^+}{Z_{c,m}} e^{-j\beta_m z} - \frac{V_m^-}{Z_{c,m}} e^{j\beta_m z}$
模式矢量	$\bar{e}_m = \begin{cases} \hat{z} \times \nabla_t \phi_m, & \text{TE} \\ -\nabla_t \phi_m, & \text{TM, TEM} \end{cases}$	$\bar{h}_m = \frac{Z_{c,m}}{\eta_m} \hat{z} \times \bar{e}_m$
正交性	$\int_S \bar{e}_m \cdot \bar{e}_n dS = 0, \quad n \neq m$	
归一化	$\frac{Z_{c,m}}{\eta_m} \int_S \bar{e}_m \cdot \bar{e}_m dS = 1$	
传播常数	$\beta_m = \sqrt{\omega^2 \mu \epsilon - k_{t,m}^2}$	

续表

特 征	电场/电压	磁场/电流
波阻抗	$\eta_m = \omega\mu / \beta_m$,	TE
	$\eta_m = \beta_m / \omega\varepsilon$,	TM
	$\eta_m = \sqrt{\mu / \varepsilon}$,	TEM
标量势	方程: $\nabla_t^2 \phi_m + k_{t,n}^2 \phi_m = 0$, $\bar{r} \in S$	TE, TM
	$\nabla_t^2 \phi_m = 0$, $\bar{r} \in S$	TEM
	边界条件: $\frac{\partial \phi_m}{\partial n} = 0$, $\bar{r} \in C$	TE
	$\phi_m = 0$, $\bar{r} \in C$	TM
	$\frac{\partial \phi_m}{\partial t} = 0$, $\bar{r} \in C$	TEM

对于 TE 模, 磁场纵向分量满足标量 Helmholtz 方程

$$\nabla_t^2 H_z + k_{t,n}^2 H_z = 0 \quad (7-10)$$

H_z 在横向截面满足的边界条件是

$$\frac{\partial H_z}{\partial n} = 0 \quad (7-11)$$

$k_{t,n}$ 代表第 n 个模式的横向波数, 微分算符 $\partial/\partial n$ 代表横向边界面外法向的方向导数。

对于 TM 模, 电场纵向分量满足标量 Helmholtz 方程

$$\nabla_t^2 E_z + k_{t,n}^2 E_z = 0 \quad (7-12)$$

E_z 在横向截面满足的边界条件是

$$E_z = 0 \quad (7-13)$$

当满足边界条件的纵向场模式求得之后, 即可按照式 (7-8) 和式 (7-9) 得到横向场模式。

例如, 沿 $+z$ 方向传播的 TE 模横向场为

$$\bar{E}_t = \frac{j k_0}{k_t^2} \eta_0 \hat{z} \times \nabla_t H_z \quad (7-14)$$

$$\bar{H}_t = \frac{-j\beta}{k_t^2} \nabla_t H_z = \frac{1}{\frac{\omega\mu_0}{\beta}} \hat{z} \times \bar{E}_t \quad (7-15)$$

可知波阻抗 $\eta_{TE} = \frac{\omega\mu_0}{\beta}$ 。沿 $+z$ 方向传播的 TM 模横向场为

$$\bar{E}_t = \frac{-j\beta}{k_t^2} \nabla_t E_z \quad (7-16)$$

$$\bar{H}_t = -\frac{j k_0 \bar{\varepsilon}_r}{k_t^2} \frac{1}{\eta_0} \hat{z} \times \nabla_t E_z = \frac{1}{\frac{\beta}{\omega\varepsilon_0 \bar{\varepsilon}_r}} \hat{z} \times \bar{E}_t \quad (7-17)$$

可知波阻抗 $\eta_{TM} = \frac{\beta}{\omega\varepsilon_0 \bar{\varepsilon}_r}$ 。

将式 (7-10)、式 (7-17) 作为整体, 第 n 个 TE 模或 TM 模的纵向场量统一视为标量势函数 ϕ_n , 因此, 在波导横截面上求解 Helmholtz 方程本征值问题, 可得到式 (7-3) 和式 (7-4) 中的横向场模式矢量 \bar{e}_n 和 \bar{h}_n 。横向波数 $k_{t,n}$ 即是本征值, 在横截面 S 上

$$\nabla_t^2 \phi_n + k_{t,n}^2 \phi_n = 0 \quad (7-18)$$

在横截面 S 的边界 C 上 TE 模和 TM 模的边界条件分别写作

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi_n}{\partial n} &= 0, & \text{TE} \\ \phi_n &= 0, & \text{TM} \end{aligned} \quad (7-19)$$

可以根据求解得到的标量本征函数 ϕ_n 确定电场横向场模式矢量 \bar{e}_n 的形式是

$$\begin{aligned} \bar{e}_n &= \hat{z} \times \nabla_t \phi_n, & \text{TE} \\ \bar{e}_n &= -\nabla_t \phi_n, & \text{TM} \end{aligned} \quad (7-20)$$

磁场横向场模式矢量 \bar{h}_n 则可通过其与电场横向场模式矢量 \bar{e}_n 之间满足的波阻抗关系来确定

$$\bar{h}_n = \frac{1}{\eta} \hat{z} \times \bar{e}_n \quad (7-21)$$

横向场模式的重要性质是彼此正交。任意两个不同模式的模式矢量 \bar{e}_m , \bar{e}_n , \bar{h}_m , \bar{h}_n , $m \neq n$ 在波导横截面 S 上满足

$$\iint_S \bar{e}_m \cdot \bar{e}_n dS = 0 \quad (7-22)$$

$$\iint_S \bar{h}_m \cdot \bar{h}_n dS = 0 \quad (7-23)$$

$$\iint_S \bar{e}_m \times \bar{h}_n \cdot \hat{z} dS = 0 \quad (7-24)$$

上述正交性质可通过二维情形的标量 Green 恒等式得出。例如, 令两个不同模式的标量本征函数分别为 ϕ_m 和 ϕ_n , 对应本征值分别是 $k_{t,m}$ 和 $k_{t,n}$, 在波导横截面 S 及其边界 C 上, ϕ_m 和 ϕ_n 满足恒等式

$$\iint_S (\phi_m \nabla_t^2 \phi_n + \nabla_t \phi_m \cdot \nabla_t \phi_n) dS = \int_C \phi_m \frac{\partial \phi_n}{\partial n} dl \quad (7-25)$$

$$\iint_S (\phi_n \nabla_t^2 \phi_m + \nabla_t \phi_n \cdot \nabla_t \phi_m) dS = \int_C \phi_n \frac{\partial \phi_m}{\partial n} dl \quad (7-26)$$

两式左右相减, 有

$$\iint_S (\phi_m \nabla_t^2 \phi_n - \phi_n \nabla_t^2 \phi_m) dS = \int_C \left(\phi_m \frac{\partial \phi_n}{\partial n} - \phi_n \frac{\partial \phi_m}{\partial n} \right) dl \quad (7-27)$$

将 ϕ_m 和 ϕ_n 各自满足的 Helmholtz 方程左端代入上式左端, 得到

$$(k_{t,m}^2 - k_{t,n}^2) \iint_S \phi_m \phi_n dS = \int_C \left(\phi_m \frac{\partial \phi_n}{\partial n} - \phi_n \frac{\partial \phi_m}{\partial n} \right) dl \quad (7-28)$$

按照式(7-19), 当 $k_{t,m}^2 \neq k_{t,n}^2$ 情况下, 无论是 TE 模的边界条件还是 TM 模的边界条件, 式(7-28)右端恒为零, 因此标量本征函数 ϕ_m 和 ϕ_n 正交, 进一步即可得出对应的横向场模式也满足正交。事实上, $\{\bar{e}_m\}$, $\{\bar{h}_m\}$ 是完备正交系。另外, 利用 ϕ_m 及其共轭 ϕ_m^* 满足的 Green 恒等式关系, 还可得出本征值只能是实数的结论, 同时, 可将本征函数取作实值函数。作为常用实例, 表 7-2 给出矩形波导归一化的本征模各分量表达式。

表 7-2 矩形波导归一化本征模

本征模分量 (单位: m^{-1})	TE _{mn} 模	TM _{mn} 模
e_x	$\frac{n\pi}{b} A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$	$A_{mn} \frac{m\pi}{a} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$
e_y	$-\frac{m\pi}{a} A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$	$A_{mn} \frac{n\pi}{b} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$
e_z	0	$-\frac{k_{t, mn}^2}{j\beta} A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$
h_x	$\frac{m\pi}{a} A_{mn} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$	$-A_{mn} \frac{n\pi}{b} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$
h_y	$\frac{n\pi}{b} A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$	$A_{mn} \frac{m\pi}{a} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$
h_z	$\frac{k_{t, mn}^2}{j\beta} A_{mn} \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)$	0

注: 当 m, n 均是正整数, 归一化系数 $A_{mn} = \frac{2}{k_{t, mn} \sqrt{ab}}$ 。对于 TE_{mn} 模, 当 m, n 有一个为零, 归一化系数 $A_{mn} = \frac{\sqrt{2}}{k_{t, mn} \sqrt{ab}}$

按照波导不连续面两侧电场横向分量相等、磁场横向分量相等的定解条件, 以波导模式的正交性为基础, 最早是 P.J.B.Clarricoats 和 K.R.Slinn, 另外还有 R.Mitra 等人对波导模式分析方法进行描述, 提出了微波网络的广义散射矩阵 (GSM) 概念, 即每个入射和出射端面可以包含除基模外的各个高次模式, 表达了各个模式的入射波和出射波的线性耦合关系。在此之后, A.Wexler 整理了模式分析法的内涵、原理、方法, 以及数值技术等各个层面, 以矩形波导 H 面双分叉 (广泛应用于电子管装置, 如速调管) 结构的严格求解为例, 用各类例子对该方法进行检验, 系统地给出了模式匹配的概念。

为了简明地说明模式匹配法的实质, 以 x 轴区间上的实函数为对象, 映射到两组不同的正交函数系上, 给出展开系数之间的线性耦合关系。波导不连续问题电场和磁场在不连续面上的匹配是类似的。

设 x 轴区间 $[0, x_0]$ 上有标准正交函数系 $\{g_m^{(1)}\}$, $m=1, 2, \dots$, 该区间的子区间 $[x_1, x_2] (x_1 \geq 0, x_2 \leq x_0)$ 上有另一个标准正交函数系 $\{g_n^{(2)}\}$, $n=1, 2, \dots$ 。区间 $[0, x_0]$ 上的某函数 $f(x)$ 在子区间 $[x_1, x_2]$ 上定义, 在子区间 $[0, x_1]$ 和 $[x_2, x_0]$ 上取零值。将 $f(x)$ 在 $[0, x_0]$ 上用 $\{g_m^{(1)}\}$ 展开并截取前 M 项, 有

$$f(x) \doteq \sum_{m=1}^M c_m^{(1)} g_m^{(1)} \quad (7-29)$$

同样地, $f(x)$ 也可在 $[x_1, x_2]$ 上用 $\{g_n^{(2)}\}$ 展开。展开式截取前 N 项, 有

$$f(x) \doteq \sum_{n=1}^N c_n^{(2)} g_n^{(2)} \quad (7-30)$$

在式 (7-29) 和式 (7-30) 中, 展开系数可简明地用内积表达

$$c_m^{(1)} = \langle f, g_m^{(1)} \rangle \quad (7-31)$$

$$c_n^{(2)} = \langle f, g_n^{(2)} \rangle \quad (7-32)$$

在区间 $[x_1, x_2]$ 上, $f(x)$ 的两个不同的展开结果式 (7-29) 和式 (7-30) 右端应相等, 即

$$\sum_{m=1}^M c_m^{(1)} g_m^{(1)} = \sum_{n=1}^N c_n^{(2)} g_n^{(2)} \quad (7-33)$$

对上式左右两端依次用 $g_m^{(1)} (m=1, 2, \dots, M)$ 作用内积，匹配的结果是矩阵方程

$$c^{(1)} = A_{12} c^{(2)} \quad (7-34)$$

其中，向量 $c^{(1)} = [c_1^{(1)}, c_2^{(1)}, \dots, c_M^{(1)}]^T$ ，向量 $c^{(2)} = [c_1^{(2)}, c_2^{(2)}, \dots, c_N^{(2)}]^T$ ， A_{12} 是 $M \times N$ 矩阵，元素 $[A_{12}]_{m,n} = \langle g_m^{(1)}, g_n^{(2)} \rangle$ 。这表明了第一个标准正交函数系的展开系数可从第二个标准正交函数系的展开系数得出。若对式 (7-33) 左右两端依次用 $g_n^{(2)} (n=1, 2, \dots, N)$ 作用内积，匹配的结果则是矩阵方程

$$A_{21} c^{(1)} = c^{(2)} \quad (7-35)$$

上式中 A_{21} 是 $N \times M$ 矩阵，元素 $[A_{21}]_{n,m} = \langle g_n^{(2)}, g_m^{(1)} \rangle$ ，表明了第二个标准正交函数系的展开系数也可从第一个标准正交函数系的展开系数得出。从内积对称性可知耦合矩阵 A_{12} 和 A_{21} 互为转置。正交函数系 $\{g_m^{(1)}\}$ 和 $\{g_n^{(2)}\}$ 的具体案例有很多，例如 Fourier 级数，

$$g_m^{(1)} = \sin \frac{m\pi x}{x_0}, \quad m=1, 2, \dots \quad (7-36)$$

$$g_n^{(2)} = \cos \left[\frac{(2n-1)\pi}{x_2 - x_1} (x - x_1) \right], \quad n=1, 2, \dots \quad (7-37)$$

7.2.2 矩形波导台阶的微波网络分析

介质匹配窗装配结构改进后的三段级联波导标准场装置有两处波导台阶。波导台阶也出现在常见的微波波导元件结构的设计之中，是基本的波导不连续性结构。本研究讨论的波导台阶是两个截面大小不同的波导不错位地连接在一起形成的，小波导腔的横截面全部包含在大波导腔横截面之中，如图 7-4 所示。小波导和大波导相互连接的横截面端面分别记作 $S_t^{(1)}$ 和 $S_t^{(2)}$ ，波导台阶所在的连接面由孔径 S_a 和电壁 S_e 两部分组成，孔径 S_a 即 $S_t^{(1)}$ ，孔径 S_a 加上电壁 S_e 即 $S_t^{(2)}$ 。可将连接面的纵坐标不失一般性地规定为 $z=0$ 。

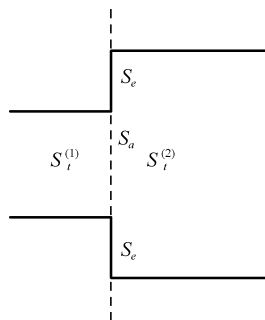


图 7-4 简单波导台阶纵向剖视示意图

波导台阶等效微波网络的描述方式包括广义散射矩阵，广义导纳矩阵等。在广义散射矩阵描述法中，各个波导端面的反射波向量 b 是广义散射矩阵 $[S]$ 与相应各个端面的入射波向量 a 的乘积

$$b = [S]a \quad (7-38)$$

对于端面 1 和 2 分别有 I 个和 J 个模式的波导台阶

$$a = [a^{(1)}, a^{(2)}]$$

$$a^{(1)} = [a_1^{(1)}, a_2^{(1)}, \dots, a_I^{(1)}] \quad (7-39)$$

$$a^{(2)} = [a_1^{(2)}, a_2^{(2)}, \dots, a_J^{(2)}]$$

$$b = [b^{(1)}, b^{(2)}]$$

$$b^{(1)} = [b_1^{(1)}, b_2^{(1)}, \dots, b_I^{(1)}] \quad (7-40)$$

$$b^{(2)} = [b_1^{(2)}, b_2^{(2)}, \dots, b_J^{(2)}]$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S^{(1,1)} & S^{(1,2)} \\ S^{(2,1)} & S^{(2,2)} \end{bmatrix} \quad (7-41)$$

例如一段长度为 d (单位: m) 的均匀波导段, 其 N 个模式的传播系数依次是 β_n , $n=1, 2, \dots, N$, 各模式在波导段内是无耦合的, 按照直观的物理意义很容易写出其广义散射矩阵表达了 N 条均匀传输线

$$\begin{aligned} [S^{(1,1)}] &= [S^{(2,2)}] = 0 \\ [S^{(2,1)}] &= [S^{(1,2)}] = \text{diag}\{e^{-j\beta_n d}\} \end{aligned} \quad (7-42)$$

为了求解广义散射矩阵, 将台阶两侧波导的电磁场各模式分别表达为入射波与反射波之和。先考虑只有小波导有入射波激励的情形。在小波导端面 (输入端面)

$$\bar{E}_t^{(1)}(x, y) = \sum_{i=1}^I (a_i^{(1)} + b_i^{(1)}) \bar{e}_i^{(1)}(x, y) \quad (7-43)$$

$$\bar{H}_t^{(1)}(x, y) = \sum_{i=1}^I \frac{a_i^{(1)} - b_i^{(1)}}{\eta_i^{(1)}} \hat{z} \times \bar{e}_i^{(1)}(x, y) \quad (7-44)$$

在大波导端面 (输出端面)

$$\bar{E}_t^{(2)}(x, y) = \sum_{j=1}^J b_j^{(2)} \bar{e}_j^{(2)}(x, y) \quad (7-45)$$

$$\bar{H}_t^{(2)}(x, y) = \sum_{j=1}^J \frac{b_j^{(2)}}{\eta_j^{(2)}} \hat{z} \times \bar{e}_j^{(2)}(x, y) \quad (7-46)$$

在连接面上切向电磁场的连续条件是孔径 S_a 两侧横向电场相等: $\bar{E}_t^{(1)} = \bar{E}_t^{(2)}$, 横向磁场相等: $\bar{H}_t^{(1)} = \bar{H}_t^{(2)}$, 在电壁 S_e 上横向电场等于零: $\bar{E}_t^{(2)} = 0$ 。将式 (7-43) 至式 (7-46) 分别代入连续条件左右两端, 得到切向磁场展开式

$$\sum_{i=1}^I \frac{a_i^{(1)} - b_i^{(1)}}{\eta_i^{(1)}} \hat{z} \times \bar{e}_i^{(1)} = \sum_{j=1}^J \frac{b_j^{(2)}}{\eta_j^{(2)}} \hat{z} \times \bar{e}_j^{(2)} \quad (7-47)$$

切向电场展开式

$$\sum_{i=1}^I (a_i^{(1)} + b_i^{(1)}) \bar{e}_i^{(1)} = \sum_{j=1}^J b_j^{(2)} \bar{e}_j^{(2)} \quad (7-48)$$

对式 (7-47) 两端分别用模式函数 $\bar{e}_i^{(1)}$ 匹配, 对式 (7-48) 两端分别用模式函数 $\bar{e}_j^{(2)}$ 匹配, 并结合模式正交关系, 可得磁场矩阵方程

$$\mathbf{Y}^{(1)}(a^{(1)} - b^{(1)}) = \mathbf{M}_{12}\mathbf{Y}^{(2)}b^{(2)} \quad (7-49)$$

电场矩阵方程

$$\mathbf{M}_{21}(a^{(1)} + b^{(1)}) = b^{(2)} \quad (7-50)$$

这里 $\mathbf{Y}^{(1)}$ 和 $\mathbf{Y}^{(2)}$ 是反映端面 1 和端面 2 各个模式波导纳的对角矩阵, 对角线元素依次是各个模式波阻抗的倒数。将端面 2 和 1 之间, 以及端面 1 和 2 之间的耦合矩阵分别记作 \mathbf{M}_{21} 和 \mathbf{M}_{12} , 两者互为转置, 矩阵元素即耦合系数是不同端面模式函数之间的内积

$$[\mathbf{M}_{21}]_{j,i} = \iint_{S_i^{(1)}} \mathbf{e}_j^{-(2)} \cdot \mathbf{e}_i^{-(1)} dS, \quad 1 \leq j \leq J, 1 \leq i \leq I \quad (7-51)$$

记 $\mathbf{M}_{21} = \mathbf{M}$, 则 $\mathbf{M}_{12} = \mathbf{M}^T$, 式 (7-49) 和式 (7-50) 可解得

$$b^{(1)} = (\mathbf{Y}^{(1)} + \mathbf{M}^T \mathbf{Y}^{(2)} \mathbf{M})^{-1} (\mathbf{Y}^{(1)} - \mathbf{M}^T \mathbf{Y}^{(2)} \mathbf{M}) a^{(1)} \quad (7-52)$$

$$b^{(2)} = 2\mathbf{M}(\mathbf{Y}^{(1)} + \mathbf{M}^T \mathbf{Y}^{(2)} \mathbf{M})^{-1} \mathbf{Y}^{(1)} a^{(1)} \quad (7-53)$$

这表明散射子矩阵 $\mathbf{S}^{(1,1)}$ 和 $\mathbf{S}^{(2,1)}$ 表达式是

$$\mathbf{S}^{(1,1)} = (\mathbf{Y}^{(1)} + \mathbf{M}^T \mathbf{Y}^{(2)} \mathbf{M})^{-1} (\mathbf{Y}^{(1)} - \mathbf{M}^T \mathbf{Y}^{(2)} \mathbf{M}) \quad (7-54)$$

$$\mathbf{S}^{(2,1)} = 2\mathbf{M}(\mathbf{Y}^{(1)} + \mathbf{M}^T \mathbf{Y}^{(2)} \mathbf{M})^{-1} \mathbf{Y}^{(1)} \quad (7-55)$$

为了得到散射子矩阵 $\mathbf{S}^{(2,2)}$ 和 $\mathbf{S}^{(1,2)}$, 再考虑只有大波导有入射波激励的情形, 大波导端面有入射波 $a^{(2)}$ 和反射波 $b^{(2)}$, 小波导端面只有反射波 $b^{(1)}$ 。与上述过程一致, 在连接面两侧对切向电场、切向磁场以两个波导各自的正交模式展开。匹配过程也是一致的, 即逐一使用大波导的模式函数对电场方程两端匹配, 用小波导的模式函数对磁场方程两端匹配。另外可知连接面两侧正交模式之间的耦合矩阵同样是 \mathbf{M}_{21} 和 \mathbf{M}_{12} 。这种情况下的电场矩阵和磁场矩阵分别是

$$(a^{(2)} + b^{(2)}) = \mathbf{M}_{21}b^{(1)} \quad (7-56)$$

$$\mathbf{M}_{12}\mathbf{Y}^{(2)}(a^{(2)} - b^{(2)}) = \mathbf{Y}^{(1)}b^{(1)} \quad (7-57)$$

用式 (7-56) 和式 (7-57) 可得到散射子矩阵 $\mathbf{S}^{(2,2)}$ 和 $\mathbf{S}^{(1,2)}$ 如下

$$\mathbf{S}^{(2,2)} = [\mathbf{M}\mathbf{Z}^{(1)}\mathbf{M}^T\mathbf{Y}^{(1)} + \mathbf{U}]^{-1} [\mathbf{M}\mathbf{Z}^{(1)}\mathbf{M}^T\mathbf{Y}^{(2)} - \mathbf{U}] \quad (7-58)$$

$$\mathbf{S}^{(1,2)} = 2\mathbf{Z}^{(1)}\mathbf{M}^T\mathbf{Y}^{(2)}[\mathbf{M}\mathbf{Z}^{(1)}\mathbf{M}^T\mathbf{Y}^{(2)} + \mathbf{U}]^{-1} \quad (7-59)$$

这里 \mathbf{U} 是 $J \times J$ 阶单位矩阵, 波阻抗对角线矩阵 $\mathbf{Z}^{(1)} = \text{diag}\{\eta_i^{(1)}\}$ 。

通过散射参数的求解, 可得到各反射波模式的幅度和相位。输入波导和输出波导的场则是各入射波和反射波模式场的加和。

矩形波导台阶是规则几何结构, 耦合矩阵式 (7-51) 有解析闭式表达式。对于台阶结构在 x 方向和 y 方向对称的情形, 在模式匹配法中可利用 $\text{TE}_{mn}/\text{TM}_{mn}$ 模式关于波导宽边中心线和窄边中心线的对称 (偶对称) 和反对称 (奇对称) 性质简化问题分析过程。表 7-3 列出了矩形波导 TE/TM 模式的奇偶对称性。因此可知对于 x 方向和 y 方向对称的台阶结构, 输入输出端面的两个模式若彼此的宽边脚标 m 或窄边脚标 n 的奇偶性不同, 则它们之间耦合系数为零, 例如 TE_{奇偶} 模与 TE_{奇奇}/TM_{奇奇} 模、TE_{偶偶}/TM_{偶偶} 模, 以及 TE_{偶奇}/TM_{偶奇} 模是无耦合的, 因此可对台阶两端的模式按奇偶性划分, 对奇模式入射波激励的响应得到的是奇模式反射波, 对偶模式激励的响应得到的是偶模式反射波。在两端模式分别按奇偶性划分后, 耦合矩阵是 2×2 块对角矩阵

$$\mathbf{M}_{21} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\text{奇奇}}^{21} & \mathbf{M}_{\text{奇偶}}^{21} \\ \mathbf{M}_{\text{偶奇}}^{21} & \mathbf{M}_{\text{偶偶}}^{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\text{奇奇}}^{21} & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_{\text{偶偶}}^{21} \end{bmatrix} \quad (7-60)$$

$$\mathbf{M}_{12} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\text{奇奇}}^{12} & \mathbf{M}_{\text{奇偶}}^{12} \\ \mathbf{M}_{\text{偶奇}}^{12} & \mathbf{M}_{\text{偶偶}}^{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\text{奇奇}}^{12} & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_{\text{偶偶}}^{12} \end{bmatrix} \quad (7-61)$$

按上述奇偶模分析, 小波导端面 (端面 1) 有激励且大波导端面 (端面 2) 无激励时, 矩阵方程的磁场等式 (7-49) 和电场等式 (7-50) 可写为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{\text{奇}}^{(1)} & 0 \\ 0 & \mathbf{Y}_{\text{偶}}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{\text{奇}}^{(1)} \\ a_{\text{偶}}^{(1)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_{\text{奇}}^{(1)} \\ b_{\text{偶}}^{(1)} \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\text{奇奇}}^{12} & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_{\text{偶偶}}^{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{\text{奇}}^{(2)} & 0 \\ 0 & \mathbf{Y}_{\text{偶}}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{\text{奇}}^{(2)} \\ b_{\text{偶}}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (7-62)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\text{奇奇}}^{21} & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_{\text{偶偶}}^{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{\text{奇}}^{(1)} \\ a_{\text{偶}}^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{\text{奇}}^{(1)} \\ b_{\text{偶}}^{(1)} \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{\text{奇}}^{(2)} \\ b_{\text{偶}}^{(2)} \end{bmatrix} \quad (7-63)$$

大波导端面 (端面 2) 有激励且小波导端面 (端面 1) 无激励时, 矩阵方程电场等式 (7-56) 和磁场等式 (7-57) 可写为

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{\text{奇}}^{(2)} \\ a_{\text{偶}}^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{\text{奇}}^{(2)} \\ b_{\text{偶}}^{(2)} \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\text{奇奇}}^{21} & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_{\text{偶偶}}^{21} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{\text{奇}}^{(1)} \\ b_{\text{偶}}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (7-64)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\text{奇奇}}^{12} & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_{\text{偶偶}}^{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{\text{奇}}^{(2)} & 0 \\ 0 & \mathbf{Y}_{\text{偶}}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{\text{奇}}^{(2)} \\ a_{\text{偶}}^{(2)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_{\text{奇}}^{(2)} \\ b_{\text{偶}}^{(2)} \end{bmatrix} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{\text{奇}}^{(1)} & 0 \\ 0 & \mathbf{Y}_{\text{偶}}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{\text{奇}}^{(1)} \\ b_{\text{偶}}^{(1)} \end{bmatrix} \quad (7-65)$$

式 (7-62) 和式 (7-63) 得出的是一组彼此独立的奇模方程和偶模方程, 同样地, 式 (7-64) 和式 (7-65) 也是如此。奇偶模分析对于对称结构的问题是十分有利的, 在实际中输入端波导的激励只有主模 TE_{10} , 因此在波导台阶的耦合作用只能产生脚标 m 是奇数, 脚标 n 是偶数的反射波模式。

表 7-3 矩形波导模式奇偶对称性

$\text{TE}_{mn}/\text{TM}_{mn}$ 模	x 方向分布	x 方向对称性	y 方向分布	y 方向对称性
x 分量	余弦: m 个半周期	m 是奇数: 反对称	正弦: n 个半周期	n 是奇数: 对称
		m 是偶数: 对称		n 是偶数: 反对称
y 分量	正弦: m 个半周期	m 是奇数: 对称	余弦: n 个半周期	n 是奇数: 反对称
		m 是偶数: 反对称		n 是偶数: 对称

按矩形波导归一化本征模各分量, 对应表达式代入式 (7-51) 即可得到 TE 模与 TE 模, TE 模与 TM 模, TM 模与 TE 模, 以及 TM 模与 TM 模之间耦合元素的算式。

在前面的讨论中, 台阶两侧的波导都是被单独地激励。但无论波导台阶两侧入射波情况如何, 波导横向电场模式、横向磁场模式的幅度可分别类比为电压、电流。因此, 在连接面上可将每种模式用一对电压和电流表示, 这是描述波导台阶的多模等效电路。通过这一途径也能得出广义散射矩阵。

在波导台阶的两个端面上场模式的电压系数分别是 $U_m^{(1)}$ 和 $U_n^{(2)}$, 电流系数分别是 $I_m^{(1)}$ 和 $I_n^{(2)}$, 改写模式函数展开式 (7-43) 至 (7-46), 在小波导端面

$$\bar{E}_t^{(1)}(x, y) = \sum_{m=1}^M U_m^{(1)} \bar{e}_m^{(1)}(x, y) \quad (7-66)$$

$$\bar{H}_t^{(1)}(x, y) = \sum_{m=1}^M I_m^{(1)} \hat{z} \times \bar{e}_m^{(1)}(x, y) \quad (7-67)$$

在大波导端面

$$\bar{E}_t^{(2)}(x, y) = \sum_{n=1}^N U_n^{(2)} \bar{e}_n^{(2)}(x, y) \quad (7-68)$$

$$\bar{H}_t^{(2)}(x, y) = \sum_{n=1}^N (-I_n^{(2)}) \hat{z} \times \bar{e}_n^{(2)}(x, y) \quad (7-69)$$

式 (7-69) 电流系数前面加上负号是因为将流入网络的电流规定为正, 流出网络的电流规定为负。对上述四式进行模式匹配, 得到两个波导电压和电流之间的线性耦合关系

$$\sum_{m=1}^M U_m^{(1)} \iint_{S_t^{(1)}} \bar{e}_n^{(2)} \cdot \bar{e}_m^{(1)} dS = U_n^{(2)}, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (7-70)$$

$$I_m^{(1)} = \sum_{n=1}^N (-I_n^{(2)}) \iint_{S_t^{(1)}} \bar{e}_m^{(1)} \cdot \bar{e}_n^{(2)} dS, \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (7-71)$$

式 (7-70) 和式 (7-71) 即是波导台阶的多模等效电路描述。用矩阵表达为

$$\mathbf{U}^{(2)} = \mathbf{M} \mathbf{U}^{(1)} \quad (7-72)$$

$$\mathbf{M}^T \mathbf{I}^{(2)} = -\mathbf{I}^{(1)} \quad (7-73)$$

这表明大波导端面的电压可用小波导端面的电压表示, 小波导端面的电流可用大波导端面的电流表示。用入射波反射波表达电压和电流, 从式 (7-72) 和式 (7-73) 得到

$$\mathbf{a}^{(2)} + \mathbf{b}^{(2)} = \mathbf{M}(\mathbf{a}^{(1)} + \mathbf{b}^{(1)}) \quad (7-74)$$

$$\mathbf{M}^T \mathbf{Y}^{(2)}(\mathbf{a}^{(2)} - \mathbf{b}^{(2)}) = -\mathbf{Y}^{(1)}(\mathbf{a}^{(1)} - \mathbf{b}^{(1)}) \quad (7-75)$$

式中 $\mathbf{Y}^{(1)}$ 和 $\mathbf{Y}^{(2)}$ 分别是端面 1 和端面 2 的波导纳对角矩阵, 从上两个式子解出反射波 $\mathbf{b}^{(1)}$ 和 $\mathbf{b}^{(2)}$ 即得到广义散射矩阵。相比前者, 电压电流途径的优点是计算量低。

级联波导结构的广义散射矩阵是其各个不连续结构广义散射矩阵与各波导段广义散射矩阵的级联。两个散射矩阵分别记作 $\mathbf{S}_{2 \times 2}^A$ 和 $\mathbf{S}_{2 \times 2}^B$, 二端口网络 A 和 B 的级联端口有 N_2 个模式, 独立端口各有 N_1 和 N_3 个模式。反射波对于入射波的响应关系是

$$[b_1] = [\mathbf{S}_{11}^A][a_1] + [\mathbf{S}_{12}^A][a_2] \quad (7-76)$$

$$[b_2] = [\mathbf{S}_{21}^A][a_1] + [\mathbf{S}_{22}^A][a_2] \quad (7-77)$$

$$[a_2] = [\mathbf{S}_{11}^B][b_2] + [\mathbf{S}_{12}^B][a_3] \quad (7-78)$$

$$[b_3] = [\mathbf{S}_{21}^B][b_2] + [\mathbf{S}_{22}^B][a_3] \quad (7-79)$$

级联网络的广义散射矩阵是

$$[\mathbf{S}_{2 \times 2}^{AB}] = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{11}^{AB} & \mathbf{S}_{12}^{AB} \\ \mathbf{S}_{21}^{AB} & \mathbf{S}_{22}^{AB} \end{bmatrix} \quad (7-80)$$

从式 (7-76) 至 (7-79) 消去 $[b_2]$ 和 $[a_2]$, 可得式 (7-80) 四个子矩阵

$$\mathbf{S}_{11}^{AB} = [\mathbf{S}_{11}^A] + [\mathbf{S}_{12}^A]([\mathbf{U}] - [\mathbf{S}_{11}^B][\mathbf{S}_{22}^A]^{-1}[\mathbf{S}_{11}^B][\mathbf{S}_{21}^A]) \quad (7-81)$$

$$\mathbf{S}_{21}^{AB} = [\mathbf{S}_{21}^B]([\mathbf{U}] - [\mathbf{S}_{22}^B][\mathbf{S}_{11}^A]^{-1}[\mathbf{S}_{21}^A]) \quad (7-82)$$

$$\mathbf{S}_{12}^{AB} = [\mathbf{S}_{12}^A]([\mathbf{U}] - [\mathbf{S}_{11}^B][\mathbf{S}_{22}^A]^{-1}[\mathbf{S}_{11}^B]) \quad (7-83)$$

$$\mathbf{S}_{22}^{AB} = [\mathbf{S}_{22}^B] + [\mathbf{S}_{21}^B]([\mathbf{U}] - [\mathbf{S}_{22}^A][\mathbf{S}_{11}^B]^{-1}[\mathbf{S}_{21}^A][\mathbf{S}_{12}^B]) \quad (7-84)$$

在这里 $[\mathbf{U}]$ 是 $N_2 \times N_2$ 单位矩阵。

作为功率信号源的无源负载，标准场装置的输入阻抗完全取决于三段级联波导以及同轴-波导转换馈电直波导各自的等效微波网络。三段级联波导看作 S_{11} 数值已知的 TE_{10} 单端口负载。同轴-波导转换馈电直波导是二端口网络，输入端口是同轴线 TEM 模，输出端口是波导 TE_{10} 模，标准场装置的等效微波网络是这两个网络级联得到的单端口负载。

7.3 三段级联波导反射和传输特性数值实验

带波导台阶的三段级联波导标准场装置克服了现有装置介质匹配窗装配中的可靠性问题。该新结构存在的波导不连续性可能会使得液体填充波导内电磁场分布出现变化，同时也可能会改变主模 TE_{10} 的反射系数（后向散射系数）和透射系数（前向散射系数）。与现有装置比较，新结构也是几何形状规则的可计算微波结构，分析过程中涉及的矩阵方程的元素都有闭式表达式，因此，电磁场数值计算是本问题散射参数求解以及标准场定值的理想途径。

按照矩形波导台阶模式匹配法分析过程，编写了计算程序实现散射参数计算。本节列举验证实例，验证计算的准确度，对比有无波导台阶时三段级联波导的反射系数，给出标准场数值结果。计算程序的制作工具是 Intel[®] Visual Fortran Composer。

7.3.1 矩形波导台阶的求解

首先验证求解矩形波导台阶问题的特例—单个方向台阶。比如，宽边台阶，即两个连接波导的宽边长度不同而窄边长度相同。这种宽边台阶也称为 H 面台阶，横截面的突变是在 x 方向上，在 E 面即主模 TE_{10} 横向电场方向(\hat{y})与波导轴方向(\hat{z})所确定的平面($yo z$)波导尺寸固定不变。如图 7-5 所示的 H 面台阶，两侧波导宽边长度分别是 a 和 d ($a > d$)。台阶左侧端面 TE_{10} 波入射，考查入射端口反射系数。

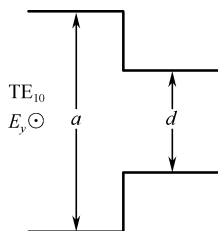


图 7-5 H 面台阶俯视图

在模式匹配分析中， H 面台阶两侧波导选取相同的模式数目 m 。记入射波的自由空间波长是 λ_0 ，在电尺寸 $a/\lambda_0=1.0$ ， $d/\lambda_0=0.6$ 时，表 7-4 列出了从只计入主模($m=1$)到模式数目增加至 13 时计算得出的主模反射系数。两侧空气波导只有主模 TE_{10} 可传播，高次模 TE_{30} ， TE_{50} ， TE_{70} ……是衰落模式，输入输出端前 7 个模式的复功率相对值($|P_i/P_0|$ ， $i=1, 2, \dots$)见表 7-5。在计算中设置 $m=13$ 。

表 7-4 H 面台阶主模反射系数

m	反射系数	反射系数-文献
1	$0.124875 + j \times 0.0$	$0.1249 + j \times 0.0$
2	$0.125300 + j \times 0.157797$	$0.1253 + j \times 0.1578$

续表

m	反 射 系 数	反射系数-文献
3	$0.119801 + j \times 0.161368$	$0.1198 + j \times 0.1614$
4	$0.119749 + j \times 0.167574$	$0.1197 + j \times 0.1676$
5	$0.115444 + j \times 0.173419$	$0.1154 + j \times 0.1734$
6	$0.116008 + j \times 0.173046$	$0.1160 + j \times 0.1730$
7	$0.114671 + j \times 0.175423$	$0.1147 + j \times 0.1754$
8	$0.114078 + j \times 0.175976$	$0.1141 + j \times 0.1760$
9	$0.114108 + j \times 0.176266$	$0.1141 + j \times 0.1763$
10	$0.113337 + j \times 0.177212$	$0.1133 + j \times 0.1772$
11	$0.113435 + j \times 0.177122$	$0.1134 + j \times 0.1771$
12	$0.113110 + j \times 0.177626$	$0.1131 + j \times 0.1776$
13	$0.112903 + j \times 0.177828$	$0.1129 + j \times 0.1778$

表 7-5 H 面台阶输入输出端的前七个模式的复功率相对值

模 式	复功率相对值 ($ P_i/P_0 $)			
	输 入 端		输 出 端	
	计 算 值	文 献 值	计 算 值	文 献 值
TE ₁₀	4.39227e-002	0.044	0.956077	0.956
TE ₃₀	0.285571	0.286	1.27741e-002	0.0127
TE ₅₀	7.66443e-003	0.0075	4.79621e-003	0.0047
TE ₇₀	1.40440e-002	0.0144	2.90345e-003	0.003
TE ₉₀	9.73335e-003	0.00025	5.86197e-003	0.0022
TE _{11,0}	1.88649e-004	—	2.07330e-003	—
TE _{13,0}	4.13762e-003	0.0051	1.09806e-003	0.0012

为 H 面台阶分别选取几种不同的宽窄形状： $d/a=0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$ ，保持宽边长度 a 的电尺寸仍然是 $a=\lambda_0$ ，在模式数目分别取 7、25 和 75 时，主模反射系数计算值见表 7-6。

表 7-6 几种不同宽窄形状 H 面台阶主模反射系数

d/a	m	反射系数幅度		反射系数相位 (°)	
		计 算 值	文 献 值	计 算 值	文 献 值
0.5	7	0.99999999	1.00	52.7081	52.71
	25	0.99999997	—	54.1917	—
	75	0.99999999	—	54.4037	—
0.6	7	0.20957749	0.210	56.8280	56.83
	25	0.21112268	—	57.9233	—
	75	0.21132641	—	58.0964	—

续表

d/a	m	反射系数幅度		反射系数相位 ($^{\circ}$)	
		计 算 值	文 献 值	计 算 值	文 献 值
0.7	7	0.10188969	0.102	54.8980	54.90
	25	0.10280716	—	55.7920	—
	75	0.10292280	—	55.9754	—
0.8	7	5.0428368e-2	0.050	45.8538	45.85
	25	5.1064850e-2	—	47.5325	—
	75	5.1110816e-2	—	47.6811	—
0.9	7	2.0085390e-2	0.021	29.7814	29.78
	25	2.0252905e-2	—	31.5279	—
	75	2.0273181e-2	—	31.7877	—

表 7-4 至表 7-6 表明求解 H 面台阶的结果与相应文献参考值吻合地很好, 检验了编写的模式匹配法计算程序求解的正确性。模式匹配法在分析 H 面台阶这种只在一个横向方向上有不连续性的结构时, 散射参数计算值随着模式数目增加很快地收敛。从表 7-4 可观察到, 与在分析中仅仅计入主模相比, 增加两个高次模式($m=3$)之后, 反射系数计算值已相当准确, 而模式数目 $m=7$ 时的计算值与 $m=13$ 时的计算值相对偏差在 0.5% 以内。对于不同的 d/a 值, 表 7-6 进一步验证了幅度和相位收敛的稳定性。可观察到幅度值比相位值收敛得更快。同时表明了对于这类特定例子取 7 个模式反射系数即在数值上获得了足够地收敛, 可满足实际需要。另一方面, 在表 7-5 可观察到第四个 (TE_{90}) 和第六个高次模 ($TE_{13,0}$) 复功率相对值与文献值的差别明显, 这一数值现象的发生是合理的。排在后面的高次模相比主模以及前面几个高次模, 散射系数幅度变得很弱, 它们对实际横向场的贡献很弱小。另外在数值技术层面, 横向波数越大的高次模在横截面上按正弦余弦函数分布的振荡频率越高, 耦合系数的计算过程会引入更明显的有限字长舍入误差, 在具体算例中高次模收敛情况可能会变差。

通过求得的散射系数和透射系数即可计算 H 面台阶两侧的横向场 E_y 和 H_x 。不失一般性, 设主模 TE_{10} 入射波电压是 1V, 输入端面横向场表达式是

$$E_y = -(1 + s_{11}) \frac{2}{\sqrt{a_1 b_1}} \sin\left(\frac{\pi x}{a_1}\right) - \sum_{i=2}^m s_{11,i} \frac{2}{\sqrt{a_1 b_1}} \sin\left[\frac{(2i-1)\pi x}{a_1}\right] \quad \text{V/m} \quad (7-85)$$

$$H_x = -\frac{1 - s_{11}}{\eta_{TE_{10}}^{(1)}} \frac{2}{\sqrt{a_1 b_1}} \sin\left(\frac{\pi x}{a_1}\right) + \sum_{i=2}^m \frac{s_{11,i}}{\eta_{TE_{2i-1,0}}^{(2)}} \frac{2}{\sqrt{a_1 b_1}} \sin\left[\frac{(2i-1)\pi x}{a_1}\right] \quad \text{A/m} \quad (7-86)$$

输出端面横向场表达式是

$$E_y = -s_{21} \frac{2}{\sqrt{a_2 b_2}} \sin\left(\frac{\pi x}{a_2}\right) - \sum_{i=2}^m s_{21,i} \frac{2}{\sqrt{a_2 b_2}} \sin\left[\frac{(2i-1)\pi x}{a_2}\right] \quad \text{V/m} \quad (7-87)$$

$$H_x = -\frac{s_{21}}{\eta_{TE_{10}}^{(2)}} \frac{2}{\sqrt{a_2 b_2}} \sin\left(\frac{\pi x}{a_2}\right) - \sum_{i=2}^m \frac{s_{21,i}}{\eta_{TE_{2i-1,0}}^{(2)}} \frac{2}{\sqrt{a_2 b_2}} \sin\left[\frac{(2i-1)\pi x}{a_2}\right] \quad \text{A/m} \quad (7-88)$$

以电尺寸 $a/\lambda_0=1.0$, $d/\lambda_0=0.6$ 的 H 面台阶为例, 考查横向场 E_y 和 H_x 在输入端面和输出端面的匹配情况。场关于波导中心 $x_0/a=0.5$ 对称, 将波导中心设为坐标原点, 图 7-6 和图 7-7 是分别取模式数目 $m=7$ 和 $m=25$ 时在半横截面各点的横向场幅度值。对于横向电场, 在波导孔径上 ($|x|/a \leq 0.30$), 当 $m=7$ 时即取得了较好的匹配, 而当 $m=25$ 时匹配程度进一步获得了提高, 可知在输入和输出波导选取较多的模式可得到较好的匹配效果。在波导台阶上 ($0.30 < |x|/a \leq 0.50$), 随着选取更多的模式, 入射端大波导中入射波和各个反射波电场的叠加接近于零, 很好地满足了电壁零场条件。出射端小波导壁 ($|x|/a = 0.30$) 是小波导每一个透射波模式电场的零点, 总电场严格为零。小波导壁在波导端面是台阶的边缘, 在此处, 大波导各模式电场之和在零值附近起伏, 在数值上无法严格地等于零。在台阶边缘的电壁上, 这种起伏波动会随着模式数目的增加而增多, 但起伏的幅度会减弱, 理论上只有当无限多的模式计入后起伏才可消除, 这是 Gibbs 现象。而横向磁场在相同数目模式下没有电场匹配得好。原因由于在小波导中该位置是电壁, 各个透射模式的横向磁场 H_x 严格为零, 但在大波导中, 这一位置是台阶面和小波导内壁之间直角连接的棱边, y 方向的棱边是横向电场 E_y 在台阶上以及小波导内壁上形成的 y 方向表面电流的奇异点, 棱边电流会产生幅度明显增大的 H_x ; 但另一方面, 从小波导内逐渐接近棱边的过程中, 横向磁场 H_x 因垂直于波导壁必须取零值, 因而可以看到输出端 H_x 在逐渐趋近波导壁时快速增大之后又快速降至零。尽管对棱边附近垂直于棱边的横向磁场 H_x 希望进行非常准确地度量, 无论是计算还是测量, 都会是徒劳的, 但这对横截面离开台阶边缘各位置 H_x 匹配程度影响较弱, 可参见表 7-7 给出的在横截面中心点的场匹配情况。另外可发现, 对于 H 面波导台阶问题的求解, 随着模式数目增加电场比磁场收敛得快, 与场的收敛相比, 网络参数收敛得更快更准确, 因此模式匹配法是有效的。

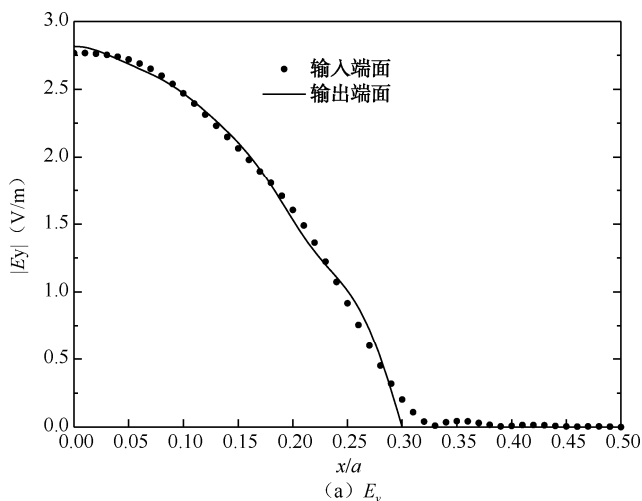


图 7-6 H 面台阶两侧的横向场 ($m=7$)

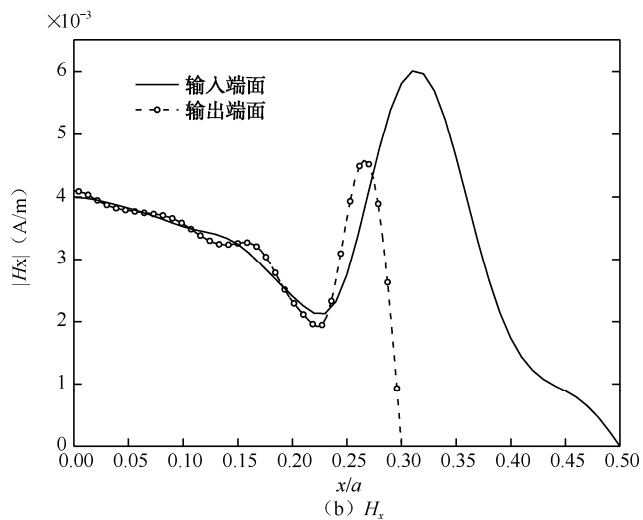
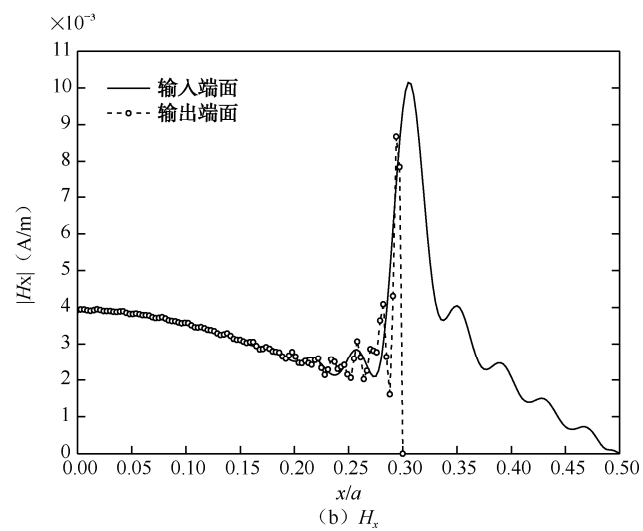
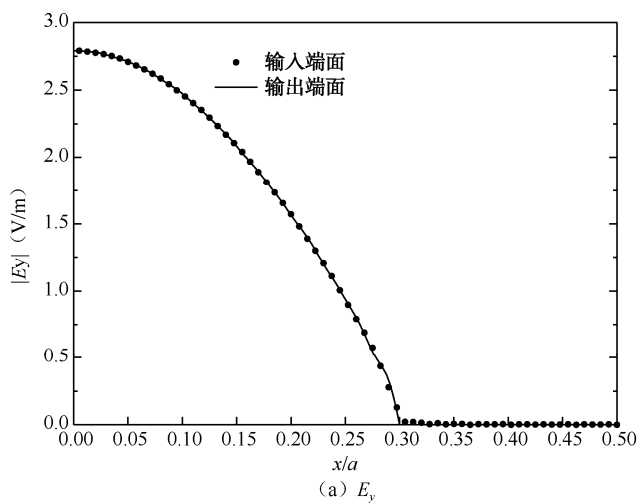
图 7-6 H 面台阶两侧的横向场 ($m=7$) (续)图 7-7 H 面台阶两侧的横向场 ($m=25$)

表 7-7 H 面台阶两侧波导端面中心点横向场的匹配 ($d/a=0.6$)

m	$E_y^{(1)}$ (V/m)	$ E_y^{(2)} - E_y^{(1)} / E_y^{(1)} $ (%)	$H_x^{(1)}$ (A/m)	$ H_x^{(2)} - H_x^{(1)} / H_x^{(1)} $ (%)
	$E_y^{(2)}$ (V/m)		$H_x^{(2)}$ (A/m)	
7	$-2.748-j \times 0.337$	1.8%	$3.936e-3 + j \times 6.661e-4$	7.17%
	$-2.794-j \times 0.357$		$4.074e-3 + j \times 4.151e-4$	
25	$-2.770-j \times 0.356$	0.1%	$3.744e-3 + j \times 1.153e-3$	3.28%
	$-2.767-j \times 0.355$		$3.798e-3 + j \times 1.037e-3$	
50	$-2.767-j \times 0.357$	0.03%	$3.830e-3 + j \times 9.497e-4$	2.07%
	$-2.768-j \times 0.357$		$3.796e-3 + j \times 1.024e-3$	
75	$-2.768-j \times 0.358$	0.02%	$3.769e-3 + j \times 1.096e-3$	1.60%
	$-2.768-j \times 0.357$		$3.794e-3 + j \times 1.038e-3$	

接下来验证单个方向的矩形波导台阶是 E 面台阶的情况。如图 7-5 所示 H 面台阶，将 TE_{10} 模入射波的极化方向在波导横截面旋转九十度，使入射电场方向与台阶方向一致， H 面台阶则成为了 E 面台阶。 E 面台阶与 H 面台阶有完全不同的电性质。入射电场在传播中遇到在电场方向上出现的波导横截面高度 (y 方向) 的改变，这种情形下台阶对入射电场的短路作用可等效为容性负载。在台阶电壁和两侧波导连接的孔径面上，边缘场出现了纵向的电场分量，相应地，在前向散射和后向散射波中产生了 TM 模式。根据对 TE 模和 TM 模奇偶对称性的分析，可知散射波各个模式成份在横截面高度上的分布都是包含了偶数数目个半周期的正弦或余弦函数。与 H 面台阶相比， E 面台阶附近的电场除具有 E_y 分量之外还有 E_z 和 E_x 分量， E_z 分量关于波导 E 面中心线是反对称的， E_x 分量关于波导 H 面中心线也是反对称的，而 E_y 分量对于 E 面和 H 面中心线都是对称的。在 E 面台阶两侧，随着散射波的传播，离开台阶方向一定距离之后高次模式迅速衰减，两侧的电场都只保留下 E_y 分量，其在横截面宽度方向依然是半个周期的正弦函数。

设主模 TE_{10} 入射波电压是 1V，在对 E 面台阶的模式匹配法求解中，两侧波导分别取前 n 个满足上述特点的 TE 和 TM 模式，当 $n=5, 15, 50$ 时，主模反射系数和透射系数的计算值如表 7-8 所示，可见散射参数收敛得很快。在 $n=15$ 时，半个横截面上各点的横向电场和磁场的幅度值分别如图 7-8 和图 7-9 所示。在 E 面，场关于波导中心线 $y_0/a=0.5$ 对称，在 H 面，场关于波导中心线 $x_0/d=0.5$ 对称，绘图时设置波导中心为坐标原点。在 E 面台阶边缘棱边附近，电场的匹配出现起伏振荡，这是由于小波导中的横向电场 E_y 分量在台阶边缘与波导壁垂直且非零值，而大波导中的 E_y 在既需要与这一非零值匹配的同时又必须满足被台阶表面电壁短路的条件，对横向电场 E_y 分量这一突变的“拟合”也会出现 Gibbs 现象。 E 面台阶对横向电场 E_y 分量的奇异性与 H 面台阶对横向磁场 H_x 分量的奇异性是类似的。图 7-10 给出了 $n=50$ 时横向电场在横截面两条中心线上的匹配情况，可以看到，随着模式数目的增加，无论是在横截面整体上还是在台阶棱边附近，横向电场的匹配均得到明显的改善。就横向电场的整体分布而言，在较少的模式数目下同样能够获得较好的匹配，可参见表 7-9 给出的中心点横向电场的匹配数据，表明了通过模式匹配法求解

E 面台阶同样是有有效的。

表 7-8 E 面台阶的主模反射系数和透射系数 ($d/a=0.6$)

n	反 射 系 数	透 射 系 数
5	$-0.2603-j \times 8.739e-2$	$0.9549-j \times 0.1128$
15	$-0.2605-j \times 8.800e-2$	$0.9547-j \times 0.1136$
50	$-0.2605-j \times 8.828e-2$	$0.9546-j \times 0.1140$

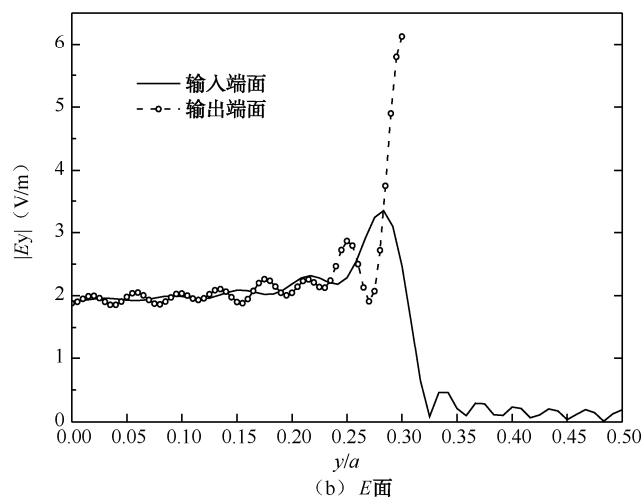
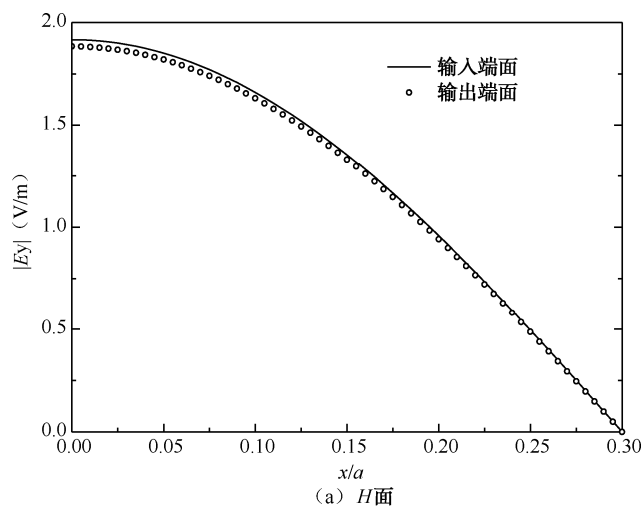
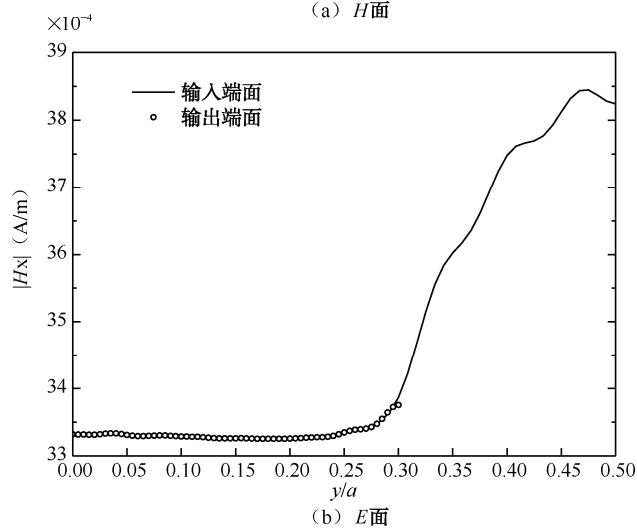
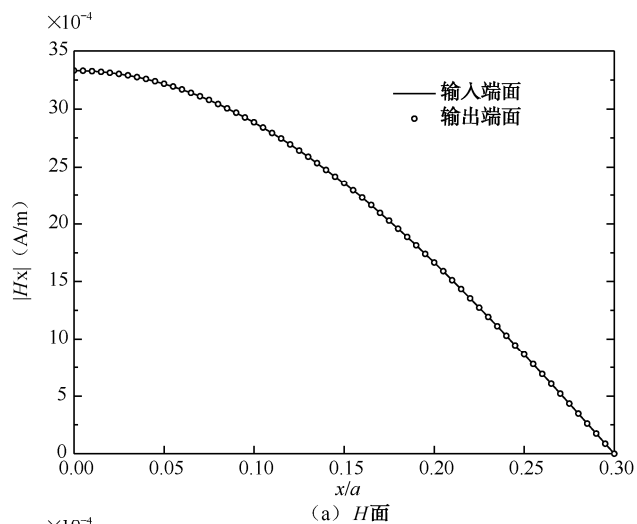
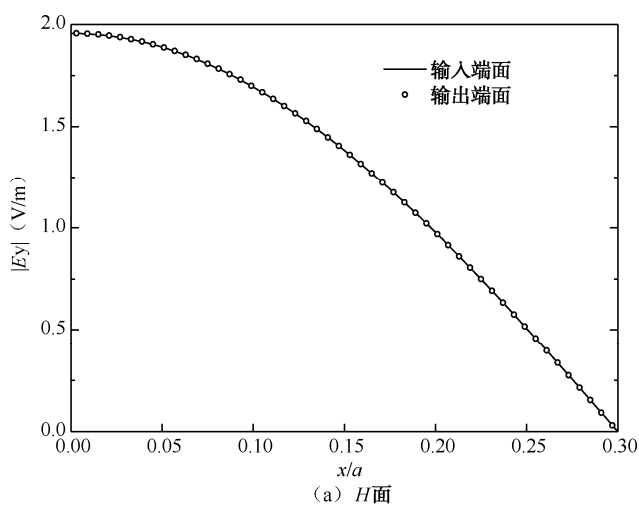
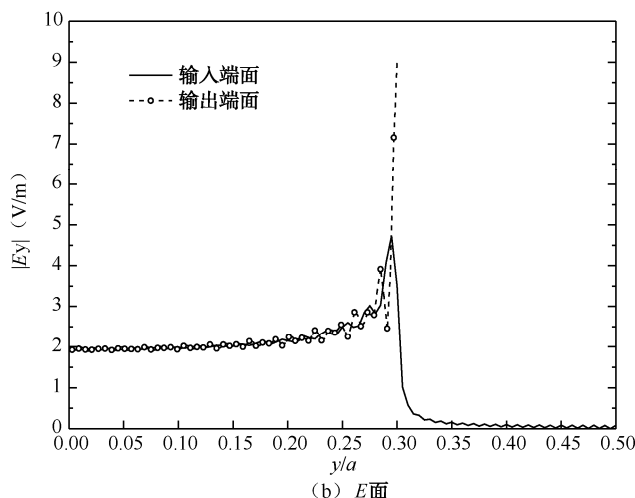


图 7-8 E 面台阶两侧的横向电场 $E_y(n=15)$

图 7-9 E 面台阶两侧的横向磁场 H_x ($n=15$)图 7-10 E 面台阶两侧的横向电场 E_y ($n=50$)

图 7-10 E 面台阶两侧的横向电场 $E_y(n=50)$ (续)表 7-9 E 面台阶两侧波导端面中心点横向场的匹配 ($d/a=0.6$)

n	$E_y^{(1)}$ (V/m)	$ E_y^{(2)} - E_y^{(1)} / E_y^{(1)} (%)$	$H_x^{(1)}$ (A/m)	$ H_x^{(2)} - H_x^{(1)} / H_x^{(1)} (%)$
	$E_y^{(2)}$ (V/m)		$H_x^{(2)}$ (A/m)	
15	$-1.903 + j \times 0.226$	1.69%	$3.28e-3 - j \times 5.91e-4$	0.42%
	$-1.871 + j \times 0.223$		$3.28e-3 - j \times 6.05e-4$	
50	$-1.942 + j \times 0.232$	0.09%	$3.28e-3 - j \times 6.11e-4$	0.06%
	$-1.944 + j \times 0.232$		$3.28e-3 - j \times 6.08e-4$	

以上通过实例验证了模式匹配法对单个方向矩形波导台阶的两种情形— H 面台阶和 E 面台阶的求解。进一步地，对在横截面长和宽两个方向上的矩形波导台阶进行求解和验证。本研究称这样的台阶是双面台阶，对于 TE_{10} 入射波， E 面方向和 H 面方向上的台阶电壁分别影响其横向电场 E_y 和横向磁场 H_x 。

对于双面台阶的模式匹配法分析，根据 TE 模和 TM 模的奇偶对称性可知前向和后向散射波的各个模式成份在横截面宽度 (x 方向) 上的分布都是包含了奇数数目个半周期的正弦或余弦函数，在高度 (y 方向) 上的分布都是包含了偶数数目个半周期的正弦或余弦函数。在计算中，两侧波导在宽度和高度方向上分别取前 m 个和前 n 个满足上述特点的模式，包括 TE 模和 TM 模，共计 $2mn$ 个模式。

如图 7-11 所示的双面台阶，以输入端波导横截面尺寸 $a \times a$ ，输出端尺寸 $0.6a \times 0.6a$ ，电尺寸 $a/\lambda_0=1.0$ 为例，分别取三组离散整数 (m, n)，求解散射参数并考查横向场的匹配情况。主模反射系数和透射系数计算值如表 7-10 所示，在双面台阶波导孔径中心点的场的匹配情况如表 7-11 所示，验证了模式匹配法的收敛。相比单一方向上的波导不连续结构，求解双面台阶这类在两个横向方向上都出现台阶的结构，达到匹配所需的模式数目会明显增加。其中主要原因是垂直于 E 面台阶棱边的电场横向分量在该棱边附近不可能得到很好的匹配，同时垂直于 H 面台阶棱边的磁场横向分量在该棱边附近也不可能得到很好的匹配，在模式数目不可能取很大的情况下（计算机内存和 CPU 时间对求逆矩阵规模的限制），这两处奇异性对应的 Gibbs 现象会引起场在数值上叠加了高频的起伏振荡，继而在一定程度上也影响了其他位置

场的匹配质量。图 7-12 和图 7-13 给出了 $(m,n)=(50,50)$ 时在台阶面两条中心线上场的波形和匹配情况, 同时可看到 Gibbs 现象对电场和磁场匹配造成的影响。关心的电路参数相比场收敛得快得多, 在实际应用中无须特别关心台阶邻近位置场值情况下, 无须计入过多数目的高次模即可求得准确的散射参数。

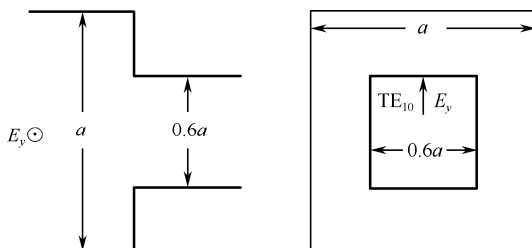


图 7-11 双面台阶纵剖图和截面图

表 7-10 双面台阶散射参数计算值

m	n	反射系数	透射系数
7	15	$-0.1321-j \times 0.1247$	$1.2166-j \times 0.1866$
25	50	$-0.1327-j \times 0.1221$	$1.2175-j \times 0.1828$
50	50	$-0.1327-j \times 0.1216$	$1.2177-j \times 0.1822$

表 7-11 双面台阶两侧波导端面中心点横向场的匹配

m	n	$E_y^{(1)}$ (V/m)	$E_y^{(2)}$ (V/m)	$H_x^{(1)}$ (A/m)	$H_x^{(2)}$ (A/m)
		$ E_y^{(2)} - E_y^{(1)} / E_y^{(1)} $ (%)		$ H_x^{(2)} - H_x^{(1)} / H_x^{(1)} $ (%)	
7	15	$-2.204 + j \times 0.410$	$-2.196 + j \times 0.396$	$3.87e-3 - j \times 1.34e-3$	$3.92e-3 - j \times 1.65e-3$
		0.74%		7.62%	
25	50	$-2.282 + j \times 0.409$	$-2.282 + j \times 0.410$	$3.82e-3 - j \times 8.34e-4$	$3.84e-3 - j \times 9.60e-4$
		0.03%		3.27%	
50	50	$-2.281 + j \times 0.408$	$-2.284 + j \times 0.409$	$3.848e-3 - j \times 1.053e-3$	$3.838e-3 - j \times 9.69e-4$
		0.12%		2.13%	

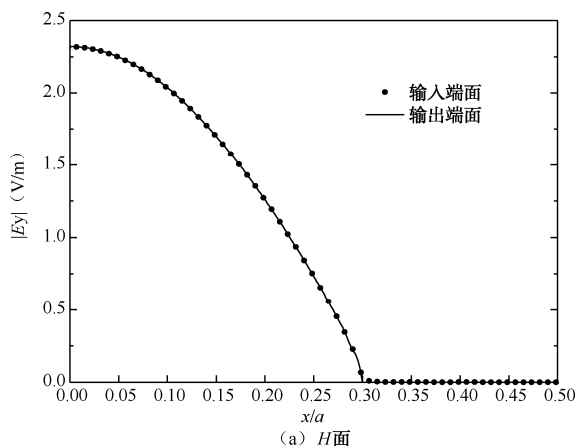
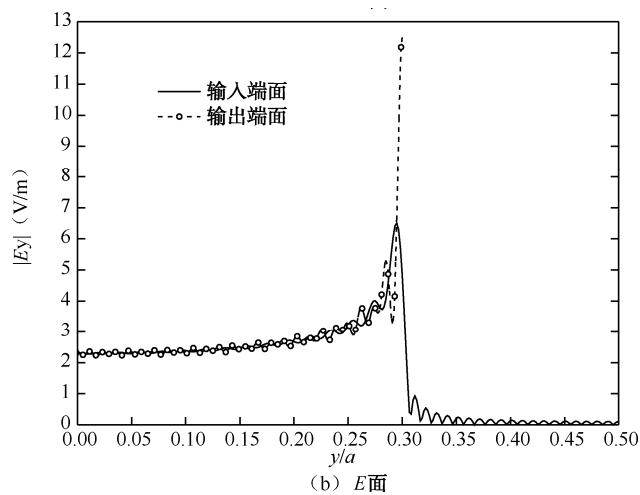
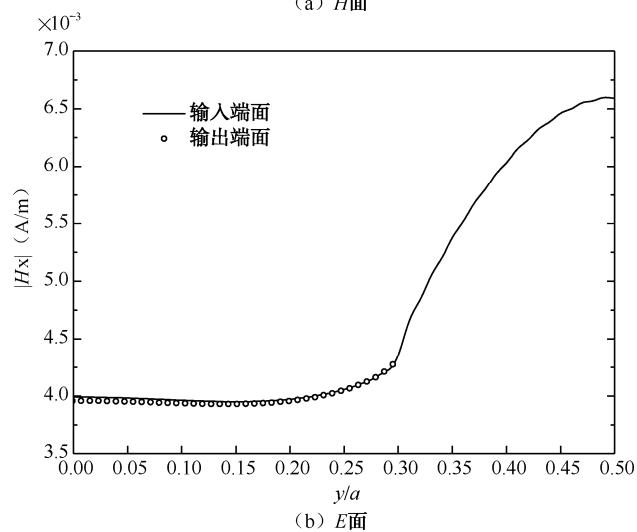
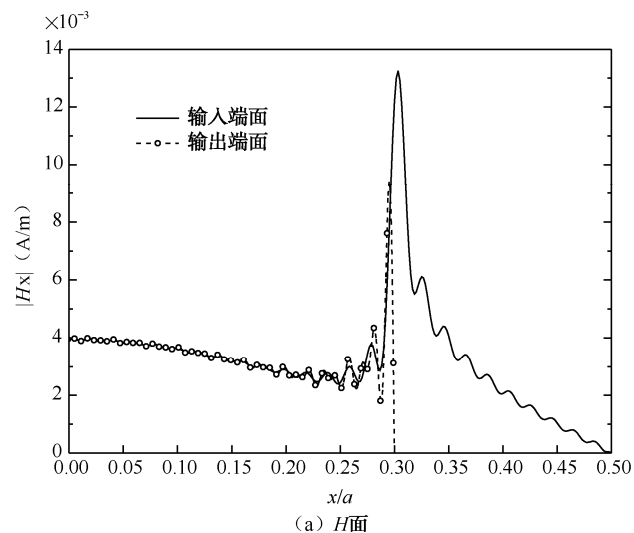


图 7-12 双面台阶中心线上横向电场 E_y 的匹配波形 ($m=50, n=50$)

图 7-12 双面台阶中心线上横向电场 E_y 的匹配波形 ($m=50, n=50$) (续)图 7-13 双面台阶中心线上横向磁场 H_x 的匹配波形 ($m=50, n=50$)

综上, 在对三类矩形波导台阶求解的验证中, 模式匹配法能够很便捷得计算散射参数。随着模式数目的增加, 场在台阶面的匹配质量会有显著的提高。对于一个特定问题 (结构、尺寸、频率), 对给定的模式数目评估计算的误差是困难的, 但当模式数目足够时, 一般认为计算值已达到了相当程度的准确度。为了兼顾计算准确度和内存与 CPU 时间开销, 台阶不连续结构应计入的模式数目有优选值, 也可能存在优选的准则。可以设想, 对于两侧波导尺寸差别较大的情形, 分别选取不同的模式数目对模式匹配法的求解将是有利的。

作为应用实例, 考虑双面台阶输出端矩形波导填充液体电介质的情形。BJ22 波导 (宽边 109.22mm, 窄边 54.61mm) 空气填充, 作为输入端与输出端被液体填充的 BJ14 波导 (宽边 165.10mm, 窄边 82.55mm) 共轴相连, 连接处构成一个双面台阶。液体是头部组织模拟液 ($\epsilon_r'=39.2, \sigma=1.80\text{S/m}, f=2.45\text{GHz}$)。在 BJ22 波导馈送主模电压 1V 时, 通过模式匹配法的求解可给出液体内的场值。计算中, 两个波导取相同的模式数目, (m,n) 分别选 (15,75), (20,60), 以及 (25,50) 三组整数, 计算结果的对比见表 7-12。透射系数以及液体波导端面中心点的横向场值都已达到收敛要求。液体波导横向电场在台阶平面中心线上的波形如图 7-14 所示。表明模式匹配法在不同计算参数设置下得出的结果稳定性很好。

表 7-12 BJ14 液体波导透射系数及端面中心的横向场

m	n	TE ₁₀ 透射系数	$E_y^{(2)}$ (V/m)	$H_x^{(2)}$ (A/m)
15	75	$0.17543+j\times 1.6036\text{e-}2$	$-4.166-j\times 0.655$	$7.161\text{e-}2-j\times 7.449\text{e-}4$
20	60	$0.17564+j\times 1.6045\text{e-}2$	$-4.169-j\times 0.655$	$7.157\text{e-}2-j\times 8.076\text{e-}4$
25	50	$0.17581+j\times 1.6066\text{e-}2$	$-4.144-j\times 0.647$	$7.156\text{e-}2-j\times 7.161\text{e-}4$

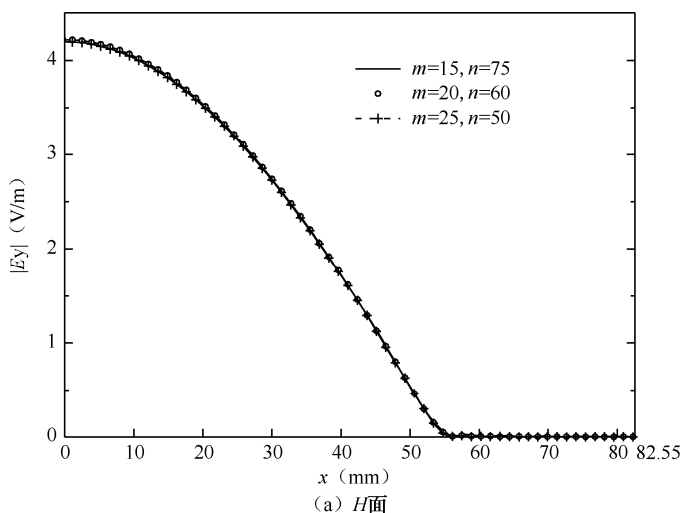
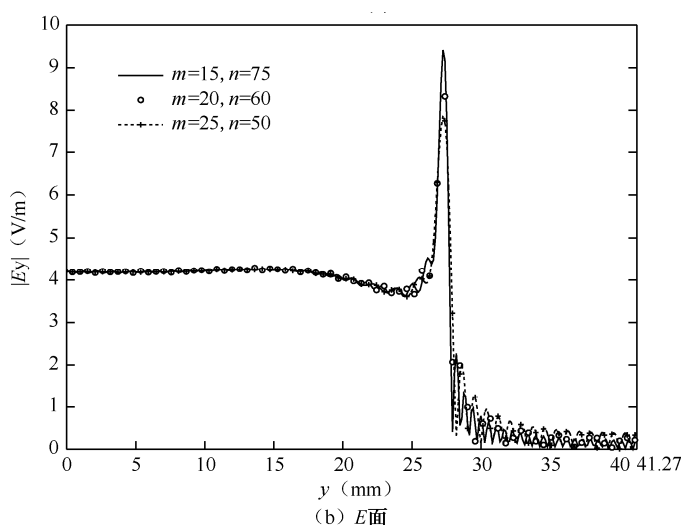


图 7-14 BJ14 液体波导台阶端面横向电场 E_y ($f=2.45\text{GHz}$)

图 7-14 BJ14 液体波导台阶端面横向电场 E_y ($f=2.45\text{GHz}$) (续)

7.3.2 三段级联波导的求解

以模式匹配法计算双面台阶散射参数为基础, 本节给出三段级联波导的反射系数和标准场, 对比引入波导台阶前后的数值结果。波导型号和介质匹配窗的尺寸如表 7-13 所示。按照空气波导 TE_{10} 主模的工作频率范围, 不同型号波导用于产生不同目标频点的标注场。BJ9 波导应用在 0.9GHz 频点, BJ14 波导应用在 1.45GHz 频点, BJ22 波导应用在 1.90GHz 和 2.45GHz 频点。三段级联均匀波导有解析解, 解析解在数值上与模式匹配法计算值完全一致, 因为后者在无波导台阶情况下任一高次模式与 TE_{10} 主模的耦合系数都是零。在四个频点上匹配窗的相对介电常数 ε_r' 取作 3.3, 电导率 σ 取作 0.001S/m 。波导填充液体规格见表 7-14。对于引入了台阶的三段级联波导, 匹配窗上下表面两处双面台阶在计算过程中取一致的模式数目, 得出级联网络的散射参数。表 7-15 给出了带台阶的三段级联波导与相应均匀波导的散射系数和场值对比, 台阶计算参数的设置是 $m=15, n=25$, 此设置使得在两处台阶的两侧中心点横向场的相对偏差不超出 5%, 如表 7-16 所示。

表 7-13 波导和介质匹配窗的尺寸

波导型号	波导尺寸 (mm)		介质匹配窗尺寸 (mm)		
	宽 边	窄 边	宽 边	窄 边	厚 度
BJ9	247.65	123.82	270.0	135.0	20.0
BJ14	165.10	82.55	180.0	90.0	20.0
BJ22	109.22	54.61	120.0	60.0	15.0

表 7-14 波导填充液体规格

波导型号	工作频率 (GHz)	标准场频点 (GHz)	头部组织液目标值 (22℃)	
			ϵ'_r	σ (S/m)
BJ9	0.76~1.15	0.90	41.5	0.97
BJ14	1.13~1.73	1.45	40.5	1.20
BJ22	1.72~2.61	1.90	40.0	1.40
		2.45	39.2	1.80

表 7-15 三段级联均匀波导与带台阶波导的电参数对比 ($m=15,n=25$)

(a) 散射参数

波导型号	频点 (GHz)	三段波导	反射系数	透射系数
BJ9	0.90	均匀	$-0.269+j\times0.544$	$0.227-j\times0.138$
		台阶	$-0.550+j\times0.480$	$0.221-j\times0.0593$
BJ14	1.45	均匀	$-0.154+j\times0.525$	$0.224-j\times0.185$
		台阶	$-0.132+j\times0.535$	$0.215-j\times0.191$
BJ22	1.90	均匀	$-0.269+j\times0.523$	$0.215-j\times0.156$
		台阶	$-0.196+j\times0.557$	$0.209-j\times0.164$
	2.45	均匀	$0.200+j\times0.288$	$0.151-j\times0.303$
		台阶	$0.296+j\times0.270$	$0.133-j\times0.302$

(b) 液体波导端面中心的电场分量

波导 型号	频点 (GHz)	三段波导	电场分量 (V/m)		
			E_y	E_y (TE ₁₀)	E_z
BJ9	0.90	均匀	$-1.83+j\times1.12$	同前列	0.0
		台阶	$-1.75+j\times0.47$	$-1.79+j\times0.48$	$(-2.49e+j\times0.206) \times e-11$
BJ14	1.45	均匀	$-2.71+j\times2.24$	同前列	0.0
		台阶	$-2.51+j\times2.26$	$-2.61+j\times2.32$	$(-4.16+j\times3.37) \times e-11$
BJ22	1.90	均匀	$-3.94+j\times2.86$	同前列	0.0
		台阶	$-3.70+j\times2.93$	$-3.82+j\times3.00$	$(-8.63+j\times5.16) \times e-11$
	2.45	均匀	$-2.76+j\times5.54$	同前列	0.0
		台阶	$-2.25+j\times5.23$	$-2.44+j\times5.53$	$(-0.536+j\times1.22) \times e-10$

表 7-16 两处波导台阶两侧端面中心横向场的匹配 (m=15,n=25)

波导 型号	频点 (GHz)	台阶 1		台阶 2	
		$ E_y^{(2)} - E_y^{(1)} / E_y^{(1)} $	$ H_x^{(2)} - H_x^{(1)} / H_x^{(1)} $	$ E_y^{(2)} - E_y^{(1)} / E_y^{(1)} $	$ H_x^{(2)} - H_x^{(1)} / H_x^{(1)} $
BJ9	0.90	0.19%	0.93%	0.44%	0.43%
BJ14	1.45	0.21%	0.78%	0.45%	0.42%
BJ22	1.90	4.8%	1.0%	1.2%	0.48%
	2.45	4.9%	0.69%	1.3%	0.43%

在过渡波导段前后端面，支撑介质匹配窗的台阶宽度和波导尺寸相比并不大，但较明显地改变了空气直波导 TE₁₀ 模反射功率。在直波导端面，E 面台阶对 TE₁₀ 模引入了容性负载，H 面台阶引入感性负载，两者作用接近平衡，因而反射系数虚部改变不显著。前后两处台阶的影响使得液体波导中轴线电场值相对于均匀波导情形下有了情况复杂的改变，TM 高次模的出现增加了 E_z 分量电场，但即使在中轴线上，其相对于 E_y 分量电场仍然很弱，在应用中完全可忽略不计。台阶端面取纵坐标 z=0，液体波导各透射波成分传播呈指数衰减，中轴线上电场 E_y 分量幅度如图 7-15 所示。

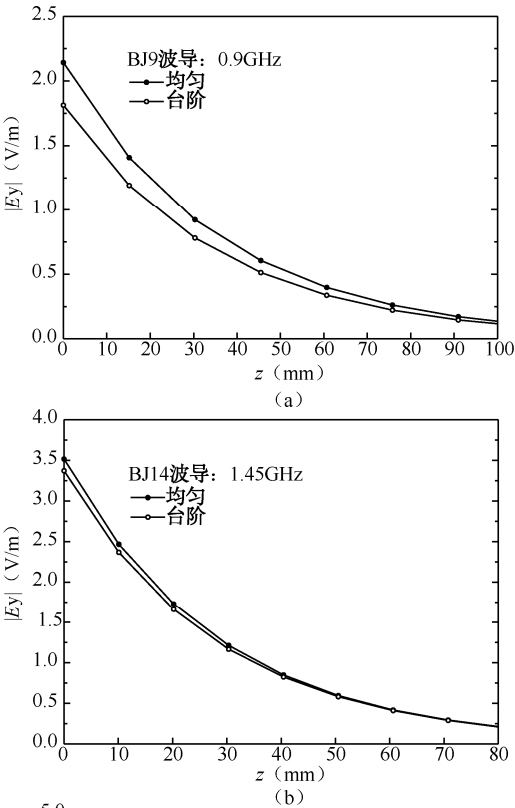
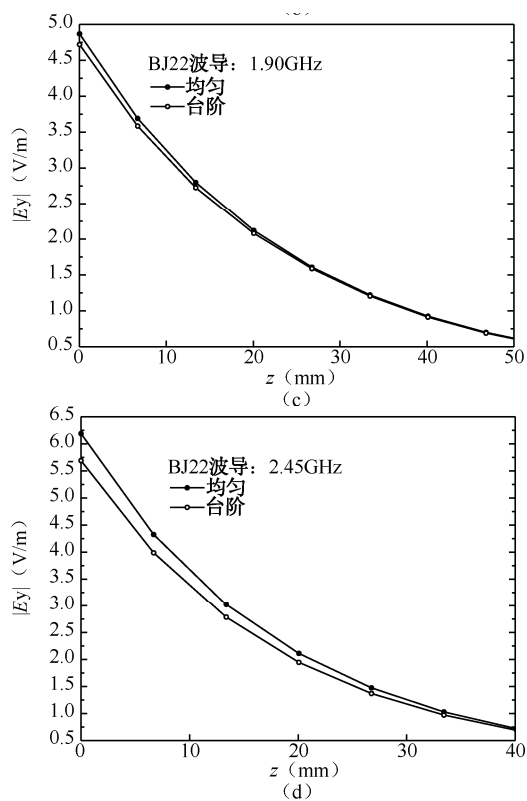


图 7-15 液体波导中轴线上电场 E_y 分量幅度

图 7-15 液体波导中轴线上电场 E_y 分量幅度 (续)

第 8 章 比吸收率测试能力验证

8.1 SAR测试能力验证的目的意义

比吸收率测试能力验证主要是验证无线设备对人体电磁辐射比吸收率检测实验室对于终端设备射频发射安全性能的测量能力，目的是识别实验室之间测量结果存在的差异，以期通过提高实验室之间测量结果的复现精度，保障测量结果的一致性，促进实验室技术和管理能力的维持与提高。参加比吸收率测试能力验证的实验室主要是比吸收率检测实验室、第三方无线通信测量实验室，以及无线终端设备生产企业内部实验室。

实验室通过比吸收率测试能力验证可获知自身测量结果同指定值对比是否达到一致，并可了解到无线终端设备测量实验室行业整体情况。若实验室测量结果相对于指定值的偏差落在不满意范围，实验室可对照查找终端设备射频性能测试项目在人员、技术、或管理上存在的问题，帮助形成有效措施，保障今后日常工作检测结果的准确度。比吸收率测试能力验证可用于发现并解决实验室在手机人体暴露量比吸收率（SAR）的测试过程中存在的问题，提高测量数据的一致性，促进实验室间的技术交流，提高实验室的测量水平。

无线数字通信终端设备检测行业经历了十年高速发展。尤其在第四代数字蜂窝移动通信 LTE 终端消费应用繁荣的背景下，2012 年以来相关检测实验室建设仍处在繁荣期。相比 LTE 制式，手机 GSM 制式最大上行发射功率高，且 LTE 技术方案的语音通信依然多采用 GSM 制式实现；另一方面，无论是安规还是性能参数方面的无线终端测试都需要使用美国和欧洲厂商的无线通信综合测试仪，上行链路参数设置较多。因此，开展手机 GSM 制式比吸收率测试一致性的比对验证有益于实验室的健康发展。

CNAS 组织的终端设备射频性能检测能力验证活动刚起步，在我国开展“手机比吸收率（SAR）测试比对”方面的能力验证活动有积极的作用和价值。在质量和认证方面，实验室和授权技术机构可利用比吸收率测试结果比对作为外部质量保证（EQA）工具来识别自身与同行机构之间的差异，及时对自身内部的质量体系进行补充维护。进一步地，检测机构的用户、监督管理机构、评价机构可利用测试比对结果来判断实验室和授权技术机构是否具有从事手机人体暴露量比吸收率（SAR）的性能检测活动的的能力，并对能力持续状况及时进行摸底。

8.2 SAR测试能力验证方法

为了考查无线通信产品安规检测实验室测试 GSM 双频手机人体暴露量比吸收率（SAR）

的测量能力。具体开展的 EGSM900 和 DCS1800 制式 SAR 测试项目涉及无线通信综合测试仪的设定和使用、样品手机和 SIM 卡设置、测量参数设置以及实验室人员管理是否满足标准要求。本书主要介绍 NIM2016E05 手机比吸收率（SAR）测试能力验证情况，包括 GSM 双频手机 900MHz 和 1800MHz 制式测试照射假人模型的比吸收率（Specific Absorption Rate）。该 SAR 测试项目测量 10g 平均 SAR 峰值，假人模型采用 SAM 假人模型。样品与 SAM 假人的相对位置：将样品正面朝上（键盘、屏幕）贴靠在 SAM 假人中央平坦肚皮，样品顶面正中心与假人中央平坦肚皮正中心在垂直方向上对齐，样品正面的顶面-底面中心线与 SAM 假人中央平坦肚皮的长轴重合，样品正面与假人紧贴。在 SAM 假人盛装入 900MHz 头部组织模拟液（介电常数标准值 41.5，电导率标准值 0.97S/m），测试样品在 EGSM900 高中低频道的语音模式时，在最大功率等级（等级 5）的相应的 SAR 值（10g）；在 SAM 假人盛装入 1800MHz 头部组织模拟液（介电常数标准值 40.0，电导率标准值 1.40S/m），测试样品在 DCS1800 高中低频道的语音模式时，在最大功率等级（等级 0）的相应的 SAR 值（10g）。测量方法依据本次检测依据 GB/T 28446.1—2012/IEC62209—1：2005 或 YD/T 1644.1—2007 进行。在测量作业过程中，注意夹具使用，确保样品位置固定，确保样品同综测仪保持连接（connected）状态。

8.2.1 参加比吸收率测试能力验证实验室情况

比吸收率测试能力验证计划邀请参加的实验室包括已通过认可的、正在申请认可的或有意向申请认可的实验室。报名并全程参加了本次能力验证计划的实验室共 19 家，实际收回检测结果 19 份。

按地理行政区划，参加本次计划的 19 家实验室分别分布在国内 10 个地市。如表 8-1 所示是参加实验室所在地市。

表 8-1 参加比吸收率测试能力验证的实验室所在地市

城 市 名 称	参加实验室数目	城 市 名 称	参加实验室数目
深圳	7	西安	1
苏州	3	昆山	1
无锡	1	南京	1
上海	1	重庆	1
东莞	2	北京	1

8.2.2 比吸收率测试能力验证样品情况

机型：诺基亚 Nokia 1050。

使用的该 GSM 双频手机样品，其射频收发电气性能稳定。

样品 EGSM900 上行频段覆盖 880M~915MHz，DCS1800 上行频段覆盖 1710M~1785MHz。样品已安装 GSM SIM 卡，样品电池可拆卸，样品配有充电器。样品已进行了稳定性考核，满足能力验证指标要求。

稳定性检验：样品在 EGSM900 高中低频道和 DCS1800 高中低频道 SAR 值（10g）已通过稳定性考核。

稳定性考核：依据能力验证提供者程序文件：PT-CX-18（均匀性和稳定性控制程序），该程序文件依据中国合格评定国家认可委员会（CNAS）文件 CNAS-GL03：2006《能力验证样品均匀性和稳定性评价指南》规范制定。若每次稳定性考核的实测值都落入稳定性区间：[稳定性考核平均值-0.3×最大允许偏差，稳定性考核平均值+0.3×最大允许偏差]，则认定样品具有稳定性。

GSM 终端型号：GSM 移动电话机 Nokia 1050。

使用 DASY5 比吸收率测试系统对 GSM 移动电话机 Nokia 1050 的 EGSM900 高中低频道和 DCS1800 高中低频道 SAR 值（10g）测试，对测量结果进行稳定性考核。样品在 2016 年 3 月期间每周测试两次，测量结果共计十次，如表 8-2 所示。

表 8-2 样品稳定性考核结果

日期	温度 ℃	湿度 %RH	EGSM 900 高中低频道			DCS 1800 高中低频道		
			SAR 值（10g）			SAR 值（10g）		
			880.2 MHz 频道	897.4 MHz 频道	914.8 MHz 频道	1710.2 MHz 频道	1747.8 MHz 频道	1784.8 MHz 频道
3 月 1 日	22.5	30.7	1.35	1.35	1.24	1.39	1.47	1.31
3 月 4 日	22.1	35.5	1.34	1.38	1.25	1.39	1.47	1.32
3 月 8 日	21.8	32.0	1.33	1.37	1.25	1.40	1.46	1.32
3 月 11 日	22.4	38.2	1.37	1.38	1.23	1.40	1.47	1.32
3 月 15 日	22.5	36.0	1.31	1.39	1.27	1.38	1.48	1.33
3 月 18 日	22.5	38.5	1.34	1.38	1.26	1.39	1.47	1.34
3 月 22 日	22.8	35.0	1.33	1.40	1.28	1.38	1.45	1.34
3 月 25 日	23.1	40.0	1.37	1.39	1.27	1.41	1.48	1.33
3 月 29 日	23.5	31.0	1.39	1.41	1.26	1.41	1.47	1.35
3 月 31 日	23.5	30.0	1.39	1.38	1.29	1.42	1.48	1.36
稳定性区间			[1.23,1.47]	[1.26,1.50]	[1.15,1.37]	[1.26,1.52]	[1.32,1.60]	[1.21,1.45]
结论			符合要求	符合要求	符合要求	符合要求	符合要求	符合要求

8.2.3 测试项目及要求

比吸收率测试能力验证依据的测试标准是：

- （1）IEC 62209—1：2005 Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices-Human models, instrumentation, and procedures-Part 1: Procedure to determine the specific absorption rate（SAR）for hand-held devices used in close proximity to the ear（frequency range of 300 MHz to 3 GHz）。
- （2）GB/T 28446.1—2012 手持和身体佩戴使用的无线通信设备对人体的电磁照射——人体模型、仪器和规程——第一部分，靠近耳边使用的手持式无线通信设备的 SAR 评估规程（频率范围 300MHz～3GHz）。
- （3）YD/T 1644.1—2007 手持和身体佩戴使用的无线通信设备对人体的电磁照射——人

体模型、仪器和规程——第一部分,靠近耳边使用的手持式无线通信设备的 SAR 评估规程(频率范围 300MHz~3GHz)。

(4) CNAS-RL02: 2016《能力验证规则》。

(5) CNAS-GL03: 2006《能力验证样品均匀性和稳定性评价指南》。

(6) CNAS-GL02: 2014《能力验证结果的统计处理和能力评价指南》。

(7) GB/T 28043—2011/ISO 13528: 2005《利用实验室间比对进行能力验证的统计方法》。

比吸收率测试能力验证要求实验室测量 GSM 双频手机样品在 EGSM900 制式高中低频道(880.2MHz 频道、897.4MHz 频道和 914.8MHz 频道),在 DCS1800 制式高中低频道(1710.2MHz 频道、1747.8MHz 频道和 1784.8MHz 频道) 10g 比吸收率值。测试结果以 W/kg 为单位,小数部分保留 2 位。

8.3 结果统计分析设计及能力评价原则

比吸收率测试能力验证被测样机在 EGSM900 上行高中低频道和 DCS1800 上行高中低频道 SAR (10g) 的指定值取为各参加实验室所报告的全体测量结果的稳健平均值,以尽量减少 SAR 测量装置电场探头系统误差带来的影响,且尽量避免离群实验室测量结果对指定值的干扰。稳健平均值及其不确定度的计算详见 GB/T 28043—2011/ISO 13528: 2005《利用实验室间比对进行能力验证的统计方法》。

为了对比实验室测量结果与指定值的一致性,对实验室的能力进行评价,本次计划采用参加实验室的结果与指定值的百分比相对偏差 D 作为能力统计量来评定实验室结果,详见 CNAS—GL02: 2014(《能力验证结果的统计处理和能力评价指南》4.4.1.3 节 b)。对每个参加实验室提交的测量结果,百分比相对偏差 $D_{\%}$ 按照下式计算:

$$D_{\%} = \frac{x - X}{X} \times 100\%$$

其中, x —参加实验室检测结果; X —指定值。

百分比相对偏差 $D_{\%}$ 的最大允许值取为 SAR 测量不确定度 ($k=2$) 的相对值 $U_{\%,k=2}$ 。比吸收率测试能力验证参照的测量标准中规范了 SAR 测量不确定度的评估办法。例如, IEC 62209—1: 2005 第 7 部分。按照 SAR 测量不确定度评定表, $U_{\%,k=2}$ 为 30%。由于在测量系统不确定度远远大于指定值 X 的不确定度 U_X , 因此直接取 $U_{\%,k=2}$ 作为差值 $D_{\%}$ 的可接受范围,即 $|D_{\%}| \leq U_{\%,k=2}$ 。

比吸收率测试能力验证对参加实验室结果的评价原则是:

$|D_{\%}| \leq U_{\%,k=2}$, 为满意结果;

$|D_{\%}| > U_{\%,k=2}$, 为不满意结果。

对各实验室报告结果分别在 EGSM900 上行和 DCS1800 上行的高中低频道进行判定,统计各实验室在所有频点中满意结果和不满意结果比例。

8.4 结果统计及能力评价

比吸收率测试能力验证共有 19 家实验室完成了全部测试。本次能力验证的指定值见表 8-3。

表 8-3 GSM 双频手机样品比吸收率指定值及其不确定度

单位：W/kg

EGSM900 制式		
频 道	指 定 值	不 确 定 度
880.2MHz 频道	1.28	0.13
897.4MHz 频道	1.28	0.10
914.8MHz 频道	1.11	0.09
DCS1800 制式		
频 道	指 定 值	不 确 定 度
1710.2MHz 频道	1.35	0.10
1747.8MHz 频道	1.39	0.09
1784.8MHz 频道	1.26	0.07

依据第三部分给出的评价原则，在六个频道测量结果均为满意的实验室共计 19 家，在至少一个频道测量结果出现不满意的报告值的实验室共计 0 家。

8.5 技术分析

比吸收率测试能力验证项目属于 GSM 双频手机射频安规测试。组织模拟液介电参数合规（±5%）验证，手机固定到假人模型是实际测试操作中 SAR 测量不确定度的重要影响因素。手机上行制式频道设置方面，需熟悉手机和无线综测仪建立语音模式连接涉及的设置：EGSM900 和 DCS1800 制式的切换，呼叫控制和设置参数，下行功率设置，加载软件选择，频道选择，用户设备功率等级，上行链路闭环功率控制设置，频道功率设置等。

参加比吸收率测试能力验证的实验室在高中低频道比吸收率测量结果均达到满意。

8.6 参加实验室测量数据和能力验证结果列表

如表 8-4、8-5、8-6 所示。

表 8-4 参加实验室比吸收率测量结果

实验室 号码	温度 ℃	湿度 %RH	EGSM 900 高中低频道			DCS 1800 高中低频道		
			SAR 值（10g）			SAR 值（10g）		
			880.2 MHz 频道	897.4 MHz 频道	914.8 MHz 频道	1710.2 MHz 频道	1747.8 MHz 频道	1784.8 MHz 频道
L001	21~22	45~53	1.38	1.34	1.15	1.53	1.57	1.38
L002	22.2	66.5	1.35	1.39	1.19	1.47	1.49	1.35
L003	23.1	52.0	1.1	1.23	1	1.34	1.38	1.23
L004	22.5	48.0	1.12	1.07	0.89	1.29	1.34	1.22
L005	22.4	63.0	1.34	1.31	1.15	1.36	1.4	1.27
L006	21.9	55.0	1.44	1.4	1.22	1.46	1.54	1.34
L007	22.0	58.0	1.37	1.33	1.14	1.41	1.43	1.23
L008	22.2	70.0	1.09	1.1	0.97	1.33	1.36	1.23
L009	22±2	52.0	1.11	1.27	1.07	1.26	1.31	1.24
L010	23	68	1.33	1.33	1.18	1.32	1.37	1.21
L011	22	56	1.23	1.24	1.08	1.51	1.73	1.64
L012	23	49	1.28	1.26	1.08	1.31	1.38	1.31
L013	22	55	1.16	1.15	1	1.25	1.3	1.2
L014	22	50	1.42	1.41	1.26	1.21	1.22	1.12
L015	22.4	56.9	1.34	1.33	1.18	1.35	1.42	1.3
L016	23	50	1.36	1.34	1.11	1.43	1.41	1.3
L017	23.5	52	1.3	1.27	1.13	1.29	1.31	1.18
L018	23.5	52	1.34	1.19	1.11	1.35	1.38	1.25
L019	23.3	51	1.34	1.32	1.19	1.29	1.33	1.22

表 8-5 参加实验室测量结果与指定值的百分比相对偏差大小

实验室 号码	EGSM 900 高中低频道			DCS 1800 高中低频道		
	SAR 值（10g）百分比相对偏差（%）大小			SAR 值（10g）百分比相对偏差（%）大小		
	880.2 MHz 频道	897.4 MHz 频道	914.8 MHz 频道	1710.2 MHz 频道	1747.8 MHz 频道	1784.8 MHz 频道
L001	8	5	4	13	13	10
L002	5	9	7	9	7	7
L003	14	4	10	1	1	2
L004	13	16	20	4	4	3
L005	5	2	4	1	1	1
L006	13	9	10	8	11	6
L007	7	4	3	4	3	2

续表

实验室 号码	EGSM 900 高中低频道			DCS 1800 高中低频道		
	SAR 值（10g）百分比相对偏差（%）大小			SAR 值（10g）百分比相对偏差（%）大小		
	880.2 MHz 频道	897.4 MHz 频道	914.8 MHz 频道	1710.2 MHz 频道	1747.8 MHz 频道	1784.8 MHz 频道
L008	15	14	13	1	2	2
L009	13	1	4	7	6	2
L010	4	4	6	2	1	4
L011	4	3	3	12	24	30
L012	0	2	3	3	1	4
L013	9	10	10	7	6	5
L014	11	10	14	10	12	11
L015	5	4	6	0	2	3
L016	6	5	0	6	1	3
L017	2	1	2	4	6	6
L018	5	7	0	0	1	1
L019	5	3	7	4	4	3

注：百分比相对偏差小数位已四舍五入

表 8-6 DASY5 SAR 测试系统 SAR(10g)值测量不确定度的因素及其影响大小

误差源	最大误差	概率分布	因子	系数	标准不确定度
测量系统误差因素					
探头校准	±10.0%	N	1.0	1.0	±10.0%
各向同性	±10.0%	R	1.732	0.7	±4.0%
半球各项同性	±10.0%	R	1.732	0.7	±4.0%
边界效应	±5.0%	R	1.732	1.0	±2.9%
线性度	±6.0%	R	1.732	1.0	±3.5%
系统检出限	±3.0%	R	1.732	1.0	±1.7%
数字转换	±0.3%	N	1.0	1.0	±0.3%
响应时间	±0.8%	R	1.732	1.0	±0.5%
积分时间	±2.6%	R	1.732	1.0	±1.5%
射频底噪	±3.0%	R	1.732	1.0	±1.7%
环境反射	±3.0%	R	1.732	1.0	±1.7%
机器手臂	±0.4%	R	1.732	1.0	±0.2%
探头走位	±3.0%	R	1.732	1.0	±1.7%
SAR 峰值	±1.0%	R	1.732	1.0	±0.6%

续表

误差源	最大误差	概率分布	因子	系数	标准不确定度
被测样品误差因素					
样品定位	$\pm 3.0\%$	N	1.0	1.0	$\pm 3.0\%$
夹具	$\pm 4.0\%$	N	1.0	1.0	$\pm 4.0\%$
功率漂移	$\pm 5.0\%$	R	1.732	1.0	$\pm 2.9\%$
假人误差因素					
假人模型	$\pm 4.0\%$	R	1.732	1.0	$\pm 2.3\%$
组织模拟液误差因素					
电导率目标值	$\pm 5.0\%$	R	1.732	1.0	$\pm 1.2\%$
电导率测量值	$\pm 2.0\%$	N	1.0	1.0	$\pm 0.9\%$
介电常数目标值	$\pm 5.0\%$	R	1.732	1.0	$\pm 1.4\%$
介电常数测量值	$\pm 2.0\%$	N	1.0	1.0	$\pm 1.0\%$
合成标准不确定度					15.0%
扩展标准不确定度					30.0%

参考文献

- [1] 千兆赫横电磁波室研制报告[R]. 中国计量科学研究院, 1993. 10.
- [2] 新型宽带横电磁传输室研制技术报告[R]. 四川大学无线电系, 1992. 9.
- [3] Camell, D.G., Larsen, E.B., Crug, J.E., NBS calibration procedure for horizontal dipole antennas (25-1000MHz). Nat. Bur. Stand. (U.S.) Tech. Note 1309, 49p, April 1987.
- [4] IEEE Std 291-1991, IEEE Standard Methods for Measuring Electromagnetic Field Strength of Sinusoidal Continuous Waves, 30Hz~30GHz.
- [5] Ralph Theodore Compton, The admittance of aperture antennas radiating into lossy media, 1964.
- [6] 钮茂德, 李翔峰, 沈颖. 开口波导法测量高损耗材料介电特性. 电子测量与仪器学报, 第2卷, 第4期, 1988.10: 31-37.
- [7] 王洪博, 杨盛祥. 波导小室标准场装置研究. 计量学报, 第19卷, 第3期, 1998年7月: 225-230.
- [8] 王洪博, 高攸纲. 波导小室标准场自动发生系统. 北京邮电大学学报, 第21卷, 第4期, 1998年12月: 1997-2000.
- [9] IEC 62209:2005 Human exposure to radio frequency fields from hand-held and body-mounted wireless communication devices - Human models, instrumentation, and procedures.
- [10] IEEE Std 1528-2003 IEEE Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Head from Wireless Communications Devices: Measurement Techniques.
- [11] YD/T 1644.1-2007 《手持和身体佩戴使用的无线通信设备对人体的电磁照射-人体模型、仪器和规程》.
- [12] Pokovic, K., Advanced Electromagnetic Probes for Near-Field Evaluation, Doc. Tech. Sci. Diss. ETH Nr. 13334, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, 1999.
- [13] Pokovic, K., Schmid, T., Kuster, N., Millimeter-resolution E-field probe for isotropic measurement in lossy media between 100 MHz and 20 GHz," IEEE Trans Instrum. Meas. vol.49, no.4, Aug.2000:873-878.
- [14] K. Meier, M. Burkhardt, T. Schmid and N. Kuster. Broadband Calibration of E-Field Probes in Lossy Media. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, 44, Oct.1996: 1954-1962.
- [15] 刘晓勇, 阚润田, 刘佳. 部分填充模拟组织液的矩形开口波导特性研究. 电波科学学报, 第26卷增刊, 2011年6月: 95-97.
- [16] CLARRICOATS, P. J. B., Properties of waveguides containing ferrites with special

reference to waveguides of circular cross-section, Ph.D. thesis, University of London, 1958.

[17] CLARRICOATS, P. J. B., Backward waves in waveguides containing dielectric, Proc. IEE, 1961, 108 C, pp. 496-501.

[18] SLINN, K. R., The excitation and some applications of backward waves in dielectric-loaded waveguides, Ph.D. thesis, Leeds University, 1966.

[19] CLARRICOATS, P. J. B., and SLINN, K. R. Computer method of determining the propagation coefficient of slotted waveguides, Electronics Letters, 1967, 3, p.191.

[20] P.J.B.Clarricoats and K.R.Slinn, Numerical solution of waveguide-discontinuity problems, Proc. IEE. vol.114, no.7, pp. 878-886, July 1967.

[21] PACE, J. R., and MITTRA, R., Generalized scattering matrix analysis of waveguide discontinuity problems, Proceedings of the symposium on quasi-optics, Polytechnic Institute of Brooklyn, 1964, pp. 177-197.

[22] WEXLER, A., Attenuating films in rectangular waveguide, Ph.D thesis, University of London, 1966.

[23] WEXLER, A., Solution of waveguide-discontinuities by modal analysis, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. mtt-15, no. 9, Sept., 1967.

[24] 尹洪雁, 刘宇军. 一种 2.45GHz 最佳结构偶极子天线的研究和试制[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(5): 165-167.

[25] 刘宇军, 尹洪雁. 一种新型数字超宽带梳状谱信号发生器的研制[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(5): 161-164.

[26] 尹洪雁, 刘宇军, 张康, 等. 食盐水标准溶液在组织模拟液介电特性测量中的应用[J]. 计量技术, 2015, (4): 10-13.

[27] Yujun Liu, Hongyan Yin, Tong Wu. Design of Wireless Sensor Network Module in Power Consumption Information Collection System Based on IPv6[C]. Shen Yang:LEMCS, 2015. 701-703.

[28] Hongyan Yin, Yujun Liu, Tong Wu. Research on Denoising Methods in Power Line Communication [C]. Shen Yang:LEMCS, 2015. 704-707.

[23] Hongyan Yin, Yujun Liu, Tong Wu. On Multi-model High-Precision Location Method of Substation Based on CSS Location Technology [C]. Shen Yang:LEMCS, 2015. 685-690.

[29] Yujun Liu, Hongyan Yin, Tong Wu. Transmission Line on-line Monitoring System Based on Ethernet and McWill [C]. Shen Yang:LEMCS, 2015. 681-684.

[30] Yue Zhang, Yujun Liu, Hongyan Yin. Multi-frequency PLC Networking Technology Based on Preamble Sequence[C]. Chang Sha:ICICTA, 2015. 552-555.

[31] 刘宇军, 尹洪雁. 消费类电子产品电磁辐射安全评价导论. 北京: 电子工业出版社, 2017.